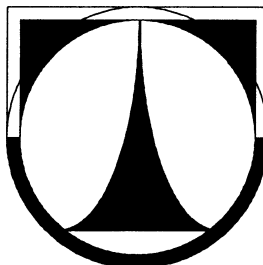

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



**PEVNOSTNÍ OPTIMALIZACE PÍSTU
PRO PLOCHODRÁŽNÍ MOTOCYKL**

FORTRESS PISTON OPTIMALIZATION
FOR SPEEDWAY MOTORCYCLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Martin Dufek

Květen 2007

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů

Obor 23 – 17 – 8

Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření

PÍSTOVÉ SPALOVACÍ MOTORY

**PEVNOSTNÍ OPTIMALIZACE PÍSTU
PRO PLOCHODRÁŽNÍ MOTOCYKL**

**FORTRESS PISTON OPTIMALIZATION
FOR SPEEDWAY MOTORCYCLE**

Diplomová práce

KVM – DP – 547

Martin Dufek

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: **Ing. Václav Rychtář**

Počet stran : 42

Počet obrázků: 27

Počet příloh : 18

Počet výkresů : 1

Květen 2007

Pevnostní optimalizace pístu pro plochodrážní motocykl

Anotace

Diplomová práce pojednává o úpravě stávajícího vyráběného pístu pro vyšší pevnostní namáhání s volbou vhodných konstrukčních úprav tvarů a rozměrů pístu spalovacího motoru tak, aby plnil správnou funkci v používaném čtyřdobém motoru. Navržené úpravy pístu podrobíme virtuálnímu namáhání pomocí metody konečných prvků a porovnáme je se známými hodnotami pevnostního výpočtu stávajícího pístu. Tyto vypočtené hodnoty se pro daný reálný píst shodují.

Klíčová slova:

PÍST,
PEVNOSTNÍ NAMÁHÁNÍ,
KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY,
METODA KONEČNÝCH PRVKŮ,
DEFORMACE

Fortress piston optimalization for speedway motorcycle

Annotation

This thesis deals with a modification of a currently produced piston for higher strength strain with a choice of appropriate construction modifications of shape and size of a combustion engine piston in such a way, so it could fulfill the correct function within a used four-stroke engine. The proposed piston modifications will be tested through virtual strain by a finite element method and further compared with known values of current piston stress calculation. These calculated values are identical for a given real piston

Key words:

PISTON,
STRENGTH STRAIN,
FINITE ELEMENT METHOD,
DEFORMATION,
CONSTRUCTION MODIFICATION

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TU Liberec má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení, apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TU Liberec, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a rad konzultanta pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Liberci 25. května 2007

.....

podpis

Poděkování

Rád bych na úvod poděkoval všem, kteří se nepřímo podíleli na této práci svými radami a podněty. Především bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Celestýnu Scholzovi, Ph.D., za bezchybné a trpělivé vedení. Další poděkování patří společnosti JAWA Divišov, a.s. jmenovitě panu Ing. Václavu Rychtáři, který dal k dispozici potřebnou dokumentaci k problematickému pístu. A v neposlední řadě panu Ing. Pavlu Brabcovi, který přispěl nejednou radou v úskalí zvládnutí softwaru Pro/Mechanika.

Martin DUFEK

Obsah

Obsah	7
Seznam použitých symbolů a zkratk	9
1 Úvod.....	10
1.1 Cíle diplomové práce	10
1.2 Plochodrážní sport	10
1.3 Optimalizace součástí	11
1.4 Trendy vývoje	11
1.5 Obecné rozdělení pístů a jejich požití z hlediska namáhání	12
2 Konstrukce pístů	13
2.1 Základní zásady a vlivy při navrhování pístů:	13
2.2 Základní parametry ovlivňující konstrukci	13
2.3 Způsoby konstrukce pístů plochodrážních motocyklů	14
2.3.1 Konstrukční prvky pístů	14
2.3.2 Dno pístu.....	14
2.3.3 Pístní kroužky	15
2.3.4 Umístění pístního čepu	15
2.3.5 Montážní vůle pístu	16
2.3.6 Rozměry pístu	19
3 Materiály pro výrobu pístů.....	19
4 Nejčastější provozní poruchy pístů	20
5 Popis a parametry motoru	21
6 Namáhání pístu	22
6.1 tepelné	22
6.1.1 Odvod tepla.....	23
6.1.2 Koeficienty přestupů tepla	23
6.2 mechanické namáhání pístu	25
6.2.1 Otáčky a střední pístová rychlost.....	26
6.2.2 Stanovení středního užitečného tlaku p_e	26
6.2.3 Kinematika pístu	27
6.3 Pevnostní výpočet pístu	28
7 Pevnostní analýza.....	28
7.1 Teplotní analýza.....	28
8 Zhotovení modelu	30
9 Výpočet proveden pomocí metody konečných prvků.	31
9.1 Příprava numerického modelu	32
9.1.1 Zadávaní materiálů	32
9.1.2 Okrajové podmínky	33

9.1.3	Rozbor výsledků	34
9.2	Příprava numerického modelu STRUCTURE.....	36
9.2.1	Okrajové podmínky STRUCTURE	36
9.3	Vlastní pevnostní výpočet.....	37
9.3.1	Deformace pístu od teploty.....	37
9.3.2	Pevnostní analýza pístu.....	37
9.3.3	Celková analýza pístu	38
9.4	Upravená varianta pístu	38
10	Diskuse výsledků	39
11	Závěr	40
11.1	Použitá literatura	42
11.2	Internetové zdroje	42
12	Přílohy.....	43

Seznam použitých symbolů a zkratek

označení	jednotky	název
α	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
L_{pl}	[mm]	Vzdálenost od dolního okraje pístu
β	[°]	úhel omezující velikost plochy na válec
β	[rad]	úhel natočení ojnice v ose horního čepu
D	[mm]	vrtání motoru
F _m	[N]	síla působící na píst ve směru osy
F _N	[N]	síla od pístu působící na válec v kolmém na osu
Δ_x	[m]	minimální průměrová vůle
λ_x	[m]	poměrová vůle za tepla
λ_h	[m]	poměrová vůle horní
λ_p	[m]	poměrová vůle pláště
λ_d	[m]	poměrová vůle dolní
λ	[-]	klikový poměr
Δt_{px}	[°C]	změna ohřátí pístu
Δt_v	[°C]	změna ohřátí válce
D _{px}	[m]	průměr pístu v ohřátém stavu
D _v	[m]	průměr válce v ohřátém stavu
Δ_x	[m]	průměrová vůle za tepla
Δ_x	[m]	průměrová vůle za studena
p	[MPa]	tlak ve válci
F _{m,e}	[N]	setrvačné síly pasivních i rotačních hmotností
α_v	$[\text{K}^{-1}]$	součinitel tepelné lineární roztažnosti materiálu
c _s	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	střední pístová rychlost
σ_m	[MPa]	napětí materiálu
p _m	[MPa]	maximální tlak
ξ	[Nm]	zdvihový moment
z	[mm]	zdvih
Q _{př}	[J]	teplo přivedené
p _e	[MPa]	středního užitečného tlaku
p _i	[MPa]	tlak indikovaný
η_m	[-]	mechanická účinnost
Hu	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$	výhřevnost paliva
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	hustota paliva
α	[°]	natočení klikové hřídele
t	[°C]	teplota stěny
ω	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$	úhlová rychlost

1 Úvod

1.1 Cíle diplomové práce

Diplomová práce pojednává o problematice konstrukce pístů plochodrážních motocyklů a s nimi spojenými problémy v extrémních zatíženích, jako jsou pevnostní výpočty pístu, stanovení dynamických sil, vliv teploty a průběh teplot. S využitím moderních technologií softwaru Pro/Mechanika pak vytvořit pevnostní analýzu a ověřit, zda píst tyto extrémní namáhání vydrží. Na základě výsledků pevnostní analýzy pak píst upravit tak, aby se jeho vlastnosti (životnost, tuhost, atd.) při provozu zlepšili.

1.2 Plochodrážní sport

Závody plochodrážních motocyklů patří už od nepaměti k atraktivním motoristickým sportům. Málo kdo si však uvědomuje, jak obrovské jsou kladeny nároky na závodní stroje a s jakými problémy se musejí konstruktéři potýkat, aby se jejich stroj neustále udržel na absolutní špičce! Dalo by se říci, že konstruktéři nespí a přemýšlí jak upravit nebo vylepšit sebemenší detail na motocyklu, který by pak v dalším závodě pomohl závodníkům k vítězství. V tomto neustálém konkurenčním boji jsou kladeny vysoké nároky na srdce motocyklu a tím je samozřejmě motor (Obr. 1).

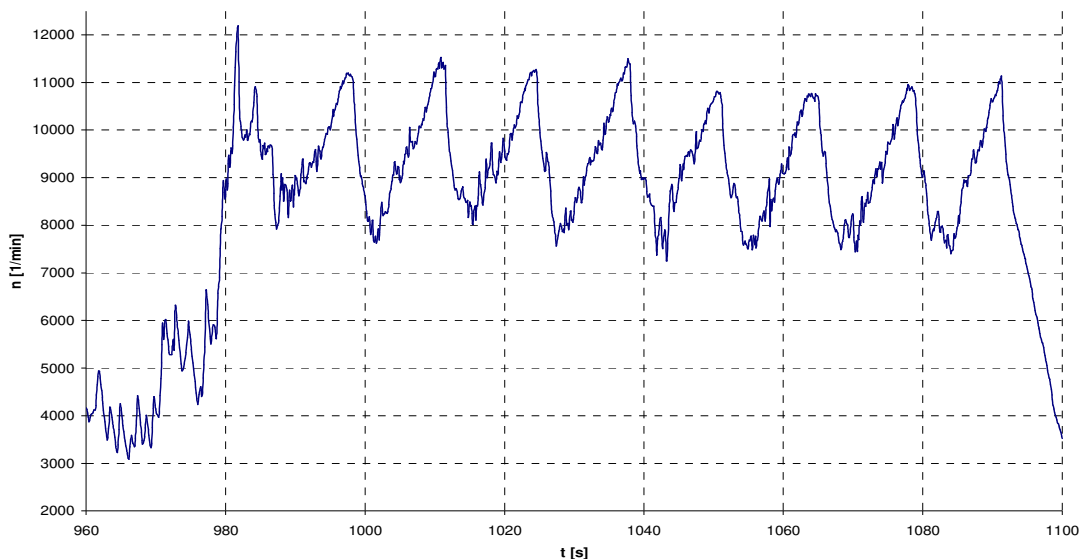
Motor musí být dobře nastaven, aby podával nejvyšší výkon ve správném rozmezí otáček, protože v plochodrážním sportu na krátkých rovinkách není čas na řazení a jezdec se musí naplno věnovat řízení! Proto se jezdí ovál na jeden zařazený rychlostní stupeň. Motor by měl mít tedy vhodnou momentovou charakteristiku, kterou by byl schopen pokrýt celou závodní trať v daném rozsahu otáček. Jezdec by měl mít k dispozici dostatečné množství akcelerační, zvláště při výjezdu ze zatáček a na rovinkách. Je nežádoucí, kdyby jezdci v průběhu průjezdu zatáčkou klesly otáčky až na takovou mez, že by motor na



Obr. 1 Motor plochodrážního stroje

výjezdu nebyl už schopen pružně zareagovat. V takovém případě je to pro jezdce taková ztráta, která znamená, že naděje na vítězství jsou ty tam. Na závodní trati je ve výsledku znát každá chybička! Proto se motory na brzdě ladí nejčastěji v daném rozsahu otáček na kvalitní

momentovou charakteristiku, než na maximální výkon. Důkazem počínání závodníka na závodní trati dokládá záznam na (Obr. 2) měřené tréninkové jízdy.



Obr. 2 Záznam tréninkové jízdy – průběh otáček v závislosti na délce tréninku

1.3 Optimalizace součástí

V současné době již vývoj motorů značně postoupil kupředu a to nejen po stránce konstrukčních materiálů, kdy se zdokonaluje samostatně každá součástka, ale hlavně díky zpřesňování výroby, které zajišťuje kvalitní a přesné slícování součástí a vysokou životnost. Stále více se i uplatňuje využívání výpočetní techniky jak pro konstrukci, tak i pro pevnostní výpočty a analýzy. Optimalizují se jednotlivé součásti i vzájemně navazující celky. Téměř u všech součástí se uvažuje časovaná pevnost. K jejich destrukci dochází jestliže se vyskytnou nějaké skryté vady v materiálu, použitím nekvalitních materiálů, nebo vznikem náhlého přetížení. Jinak destrukce dynamicky navrhovaných součástí s časovanou pevností se odehrává v rozmezí několika málo cyklů.

Samozřejmě chod motoru ovlivňuje další spousta faktorů a může se poškodit i v důsledku přehřátí, nebo špatné funkce mazání motoru.

1.4 Trendy vývoje

Píst od svého vzniku prodělal spoustu úprav a zlepšení. Vzhledem k tomu, že patří ke skupině nejvíce namáhaných součástí v pístovém spalovacím motoru, jsou na něj kladeny

vysoké nároky nejen po stránce tepelného namáhání, ale i po stránce mechanických silových namáhání.

Postupem času se ukázalo, že trend vývoje pístu směřuje k dosažení co možná nejnížší hmotnosti (nesmí vyvozovat velké setrvačné síly) a vysoké tuhosti (pevnosti) pístu. Ideální stav by byl, kdyby píst měl pouze tvar kruhové desky, na které by byla přidělána pouze ojnice, která by převáděla sílu na klikovou hřídel. To ale bohužel z hlediska namáhání není dost dobře možné! Proto se konstruktéři snaží co nejvhodněji upravit a vylepšit tvar pístu tak, aby docílili požadované podmínky.

Z historie je vidět, že se zprvu používal celoplášťový píst, poté píst s vyztužujícími žebry v oblasti pístního čepu, pak T-píst a v současné době připomíná tvar půdorysu písmeno X.

S každou úpravou můžeme pozorovat snížení boční opěrné plochy pístu, kterou se také odvádí teplo. Dalo by se říci, že se již boční plocha pístu využívá pouze k vedení ve válci a zachycení bočních sil. Základní tvar pístu ovšem vychází z účelu pro který je píst navrhován. Jsou na něho kladeny tzv. vstupní parametry a požadavky na pístovou jednotku, aby kvalitně splňoval podmínky a nároky provozu, na které je navržen.

To souvisí i se zvyšováním materiálové náročnosti jednotlivých dílů motoru, zvyšování složitosti konstrukce. Uplatňuje si i použitelnost stejných pístů v různých motorech. U materiálů závodních pístů je kladen důraz na lehké slitiny. Mají dobrou tepelnou vodivost, nevýhodou však je velká tepelná roztažnost.

1.5 Obecné rozdělení pístů a jejich požití z hlediska namáhání

- 1) nízká úroveň namáhání
- 2) střední úroveň namáhání
- 3) vysoká úroveň namáhání
- 4) speciální úroveň namáhání

Ad. 4) písty navrhované s časovou pevností, kde je stanoven přesný počet cyklů. Jedná se o extrémně lehké písty, které se používají v závodních a soutěžních vozech jako je např. F1, WRC, DTM atd.. Po uplynutí stanoveného počtu cyklů dojde k porušení, destrukci pístu. V této oblasti jsou již kladené velmi vysoké nároky na kvalitní materiál a jeho následné technologické zpracování, které ovlivňuje celkový výsledek a životnost pístu. Do této oblasti spadá i mé téma diplomové práce „Pevnostní optimalizace pístu pro plochodrážní motocykl“.

2 Konstrukce pístů

2.1 Základní zásady a vlivy při navrhování pístů:

- Správná funkce navrhované konstrukce.
- Určit směr, velikost a časový průběh působících sil a momentů, které namáhají jednotlivé díly pístové skupiny.
- Síly zachycovat tak, aby namáhání součástí bylo co nejmenší.
- Minimalizovat střídavé namáhání.
- Namáhání konstrukčního materiálu volit na hranici přípustného namáhání.
- U výkovku i odlitku volit tvarové součinitele tak, aby v maximální míře zachovaly výrobní vlákna a vzniklá vnitřní pnutí..
- Nepoužívat rovné vyztužovací stěny. Z nich pak plyne chvění, které má za následek tvorbu trhlin a nadměrný hluk.
- Počítat s rozměrovými a tvarovými změnami způsobenými ohřevem.

2.2 Základní parametry ovlivňující konstrukci

- maximální otáčky motoru $n = 12\,000\text{ 1/min}$
- zdvih klikové hřídele $z = 78\text{ mm}$
- maximální spalovací tlak $P_m = 9\text{ MPa}$
- délka ojnice motoru $l = 163\text{ mm}$
- kompresní poměr $\varepsilon = 11,5 - 17 : 1$

Maximální spalovací tlak ovšem záleží na druhu použitého paliva, jeho poměru směšování λ , na úhlu otevření sacích a výfukových ventilů, úhlu jejich vzájemného překrytí, na teplotě spalování a kvalitním odvodu tepla, časování zapalování palivové směsi. Tvarem dna pístu ve spalovacím prostoru se poměrně dobře mění kompresní poměr i vnitřní aerodynamika během pracovního cyklu, víření palivové směsi od sání až po výfuk. Na základě těchto parametrů je třeba rozhodnout do jaké míry je píst namáhán a jak se bude ubírat jeho konstrukční vývoj.

Proto je konstrukčnímu zpracování potřeba věnovat maximální pozornost, obzvláště při navrhování pístu závodního stroje, kde je stupeň namáhání opravdu vysoký!

2.3 Způsoby konstrukce pístů plochodrážních motocyklů

2.3.1 Konstrukční prvky pístů

Drážky pro pojistné kroužky, se zapichují do materiálu na krajích ok pro pístní čep. Vkládají se do nich různé druhy pojistných kroužků, aby se čep během provozu nevysunul. Nejčastěji se používají drátové pérka, z důvodů ušetření hmotností.

Oka pro pístní čep se umísťují co nejbližší dnu pístu, aby měl píst co nejnižší hmotnost. U litých pístů se používají vyztužovací žebra pod pístním čepem. V tomto případě je píst kovaný do zápustky a odlehčení pod pístním čepem v rozsahu jaký by byl třeba, je prakticky nemožné. Okem probíhá mazací drážka, druhy použití viz. [3].

Důležitější je však dobré ukotvení (zakomponování) ok do tělesa pístu. Používají se individuální varianty pro každý píst.

Odvod oleje ze stěn válce je realizován otvory umístěnými v poslední drážce pro pístní kroužek. Je třeba dodržet, aby jejich zakončení v pístu bylo zakončeno kolmo na vnitřní stěnu válce, jinak by olej protékal otvory zpět.

2.3.2 Dno pístu

Písty s tvarovaným dnem – větší styková plocha se spaliny ovlivňuje do jisté míry vnitřní aerodynamiku a šíření tepelných toků pístem - větší přestup tepla. Docílíme optimální naladění kompresního poměru a větší otevření sacích i výfukových ventilů.

Tloušťka dna pístu – je určena především mechanickými a tepelnými zatíženími. Platí: čím tlustší je dno, tím lépe se odvádí teplo a vyrovnávají se teploty v oblasti pístních kroužků, zlepšuje se tak jejich práce.

Vyztužení – vnitřní povrch dna pístu je třeba vyztužit žebry, které zvyšují jeho tuhost a snižují náchylnost deformace dna pístu od zatížení spalovacích tlaků i od teplotní deformace. Pro odvod tepla mají jen nepatrný význam, jejich teplosměnná plocha se projeví pouze při ostřiku dna pístu olejem.

2.3.3 Pístní kroužky

Hlava pístu je opatřena drážkami pro těsnící pístní kroužky utěšňující spalovací prostor a stírací pístní kroužky regulující mazání válce a pístu. Počet těsnících kroužků závisí na typu a rychloběžnosti motoru. Pro závodní motory, kde se až tolik nesleduje vliv emisí se zpravidla používají 2 kroužky a to jeden těsnící a jeden stírací z důvodů snížení pasivních odporů.

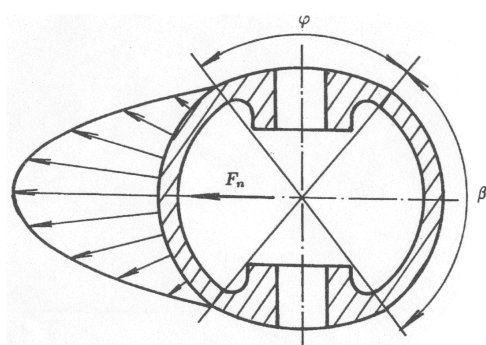
Zároveň se jejich tloušťka volí co možná nejtenčí, aby kroužek perfektně kopíroval povrch válce a dobře těsnil spalovací prostor rychloběžného motoru při dobrém zajištění mazání.

Třemi těsnícími kroužky se opatřuje většina pístů pro zajištění spolehlivého chodu.

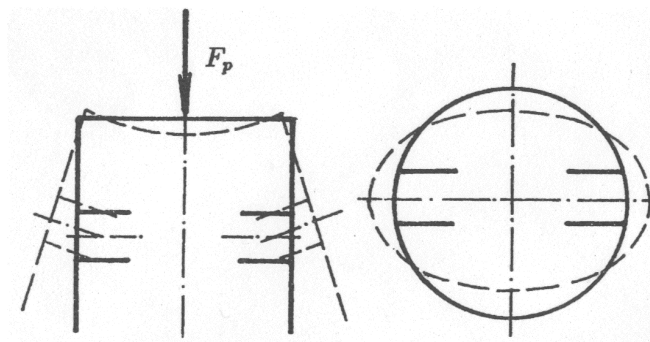
Umístění těsnícího pístního kroužku se volí ve vzdálenosti 4-8% průměru pístu se snižující tendencí k menší hodnotě rozměru. Tato plocha má vliv na tvorbu usazenin karbonu. Pístní kroužek však nemůže být umístěn příliš blízko dna pístu. V této oblasti jsou vysoké teploty a střídající se teplotní roztažnost by narušila jeho správnou činnost. Jeho umístění také ovlivňuje poloha vrcholů chladících kanálů, přes které je realizován odvod tepla. Prostřednictvím kroužků se totiž odvádí 40-60% tepla z pístu. Stírací pístní kroužek se používá skládaný ze dvou lamel mezi nimiž se nachází Expander. Přes Expander a otvory umístěnými v drážce pro pístní kroužek, se odvádí olej z povrchu stěn. Pístní kroužky jsou mezi sebou odděleny můstkem, na kterém bývá odlehčující zápich pro zvětšení objemu, který umožní lepší vyrovnání tlaků mezi kroužky. Výška můstku se pohybuje mezi 4,5 – 5 % průměru pístu. Pro zajištění dobré statické a únavové pevnosti můstků mezi drážkami pro pístní kroužky, je nutné se vyhnout ostrým přechodům v drážkách.

2.3.4 Umístění pístního čepu

Z hlediska minimálního tření se provádí ve vzdálenosti $(0,6 - 0,65) L_{pl}$ od dolního okraje pístu. L_{pl} je délka pláště pístu. Normálovou sílu z ojnice na válec přenáší pouze část pláště pístu, omezená v příčném řezu úhlem $\beta = 80$ až 100° (Obr. 3).



Obr. 3 Zatížení pláště pístu



Obr. 4 Deformace pístu v oblasti čepu

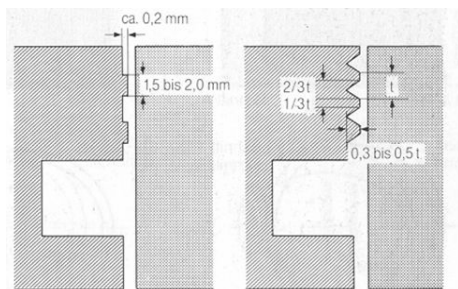
Zbývající nezatížená část pláště se deformuje tak, že její rozměr ve směru osy čepu se zvětšuje. Je vhodné připomenout, že normálová síla mění během zdvihu pístu svůj smysl. Tato deformace se zvětšuje i působením tlaku plynů na dno pístu, které se prohýbá a tím celý píst deformuje ve směru osy pístního čepu (Obr.).

2.3.5 Montážní vůle pístu

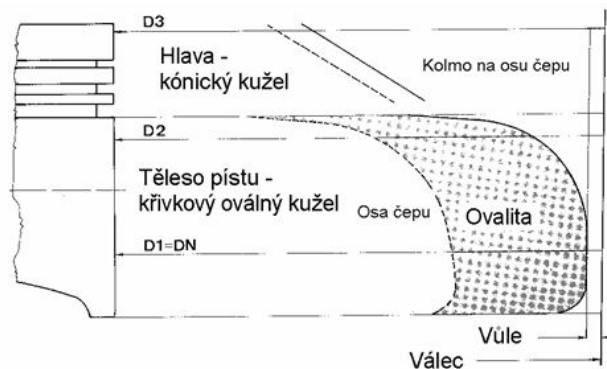
Závisí na tepelné roztažnosti materiálu a na způsobu chlazení

- voda
- vzduch.

V oblasti nad prvním těsnícím kroužkem musí být vůle o něco větší. V případě přehřátí motoru by se jinak píst zadíral. Tato plocha je navržena tak, aby se ani při vysokých teplotách nedotkla pláště válce. V této oblasti z důvodu nižších teplot a špatného proudění tvoří karbonová vrstva od spáleného oleje (Obr. 5). Olej vniká do tohoto prostoru přes pístní kroužky, nebo vodítky sacích ventilů. Proto se vytváří na ploše jemné drážky, které při pohybu napomáhají k vytloukání karbonových usazenin a jejich odvodu výfukovým potrubím. Místo drážek lze použít i výstupky na zmíněné ploše.



Obr. 5 Konstrukce plochy nad I. kroužkem



Obr. 6 Průběh boční křivky pístu

2.3.5.1 Boční profil povrchu pístu - konstrukce

Tvar povrchu pístu, tj. velikost jeho průměrů v jednotlivých místech, závisí na montážních vůlích mezi pístem a válcem. Montážní vůle jsou dány provozními vůlemi a tepelnou roztažností při ohřátí pístu na nejvyšší dovolenou provozní teplotu (Obr. 6).

Vůle mají vliv na životnost pístu. Čím je vůle mezi válcem a pístem menší, tím menší je klepání pístu a lepší podmínky pro mazání. Ve skutečnosti jsou vůle optimální pouze při určitém provozním režimu motoru.

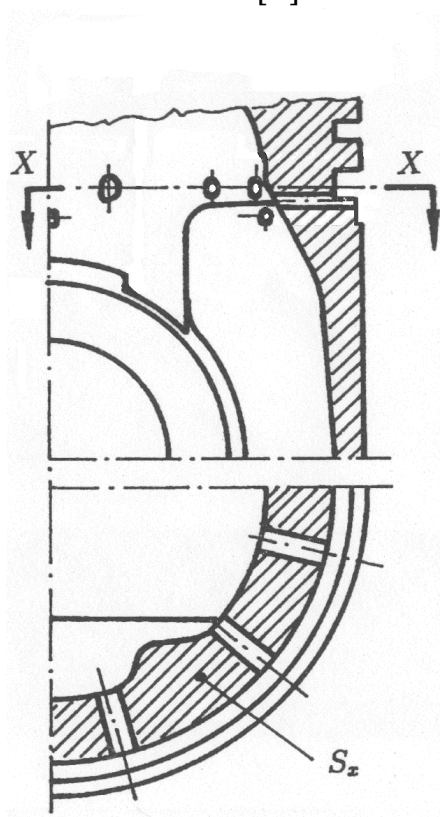
Přihlédnutím k dovoleným provozním teplotám a velikostem součinitelů délkové teplotní roztažnosti materiálu pístu se mohou vůle pístů tuhých konstrukcí informativně určit dle údajů v (Tab. 1).

Tab. 1 Používaný rozsah vůlí pístů

Materiál pístu	Vůle na horním okraji pístu	Vůle na dolním okraji pístu
Al – slitina	(0.006 - 0.01)D	(0.002 - 0.004)D

Za tepla je třeba v uvažované rovině X kolmé na osu pístu (Obr. 3) zaručit minimální průměrovou vůli

$$\Delta'_x = \lambda'_x D [m]. \quad (1)$$



Obr. 3 Výpočet nejslabšího místa pláště pístu

Zde λ'_x je poměrová vůle za tepla, definovaná jako poměr průměrové vůle za tepla k vrtání válce a D je vrtání válce.

Poměrné průměrové vůle za tepla jsou z provedených konstrukcí pístu:

- v úrovni horního okraje pístu $\lambda'_h = 0,0020$ až $0,0025$
- na rozhraní hlavy a pláště pístu $\lambda'_p = 0,0010$ až $0,0015$
- v úrovni dolního okraje pláště pístu $\lambda'_d \cong \lambda'_p$.

Ohřátím pístu v uvažované rovině X (Obr. 3) o teplotu Δt_{px} a ohřátím válce o Δt_v (po celé výšce válce se předpokládá ohřátí stejné) se zvětší průměr pístu D_{px} a válce D_v a průměrová vůle za tepla je

$$\Delta_x = D(1 + \alpha_v \Delta t_v) - D_{px}(1 + \alpha_p \Delta t_{px}) = \lambda_x D \quad (2)$$

odkud průměr pístu za studena v rovině X je

$$D_{px} = \frac{1 + \alpha_v \Delta t_v - \lambda_x}{1 + \alpha_p \Delta t_{px}} D$$

a průměrová vůle za studena

$$\Delta_x = D - D_{px} \quad (4)$$

V těchto výrazech α_v je součinitel tepelné lineární roztažnosti materiálu válce a α_p je součinitel tepelné lineární roztažnosti materiálu pístu.

Pro hliníkovou slitinu je $\alpha_{Al} = (17 \text{ až } 24) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

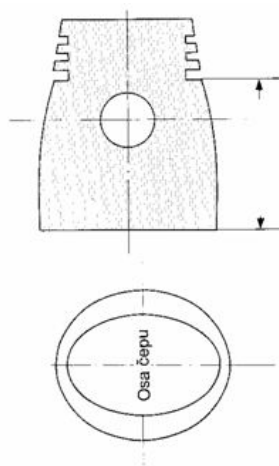
Teploty válce a pístu se zpravidla při výpočtu vůlí odhadují. Střední teplota stěny válce t_v u kapalinou chlazeného motoru je 110 až 115°C, u vzduchem chlazeného motoru asi 170°C. Střední teplota v úrovni horního okraje pístu t_{ph} pro píst s tuhým pláštěm 230 až 270°C, teplota na rozhraní mezi hlavou pístu a pláštěm t_{pp} je u pístů zážehového motoru 150 až 220°C. Střední teplota při dolním okraji pístu t_{pd} je 120 až 150°C.

2.3.5.2 Boční profil povrchu pístu - tvaru pláště pístu

Boční profil má tvar v dolní části oválnou plochu, na níž navazuje boční křivka jejíž tvar se mění po celém obvodu (

Obr. 4). Tvar tohoto profilu se nazývá oválný křivkový kužel s měnící se ovalitou. Nejlépe postihuje problémy teploty a roztažení hmot na pístu související s materiálovou roztažností [7].

Dalo by se říci, že boční křivka nemá nějaký specifický tvar. Její konečný tvar se ještě optimalizuje tak, že je na plášť nanesená záběhová vrstva grafitu. Píst se namontuje do motoru a nechá se zkušebně běžet na různé režimy otáček několik minut. Po demontáži se pak zjišťuje kde je píst od válce opsaný. Z pístu se zkopíruje tvar ovality a podle ní se tvar vyrábí. Při obrábění se křivka tvoří tak, aby měla větší vůli mezi pístem a válcem. Píst se pak ani za extrémního provozu nepřidírá.



Obr. 4 Oválný křivkový kužel s měnící se ovalitou

K zamezení zadření takto deformovaného pístu se vyrábí plášť eliptického nebo oválného tvaru nebo se píst opatřuje invarovými vložkami, případně se provádí rozříznutý plášť. U vysokovýkonných motorů se používají výhradně písty s hladkým nerozříznutým pláštěm.

2.3.6 Rozměry pístu

Rozměry pístů na plochodrážních motocyklech jsou voleny zcela individuálně podle vrtání válce a jestliže nevyhovují, dodatečně se verifikují na základě pevnostních analýz.

Při zvyšování přesnosti výroby a vývoje nových materiálů je však možné některé rozměry volit individuálně.

3 Materiály pro výrobu pístů

Materiály pístů musí splňovat:

- vysoké požadavky na pevnost, houževnatou odolnost proti opotřebení
- vysokou životnost a spolehlivost motoru
- maximální využití svých materiálových vlastností včetně plného využití tepelného zpracování

Hliníkové slitiny:

- dobré mechanické vlastnosti
- výhodná hmotnost
- dobrá tepelná vodivost
- dobrá tvářitelnost
- kvalita tepelného zpracování

Materiál pro kované písty:

- označení 42 4218.71
- složení Al Cu2 Mg Ni
- mez pevnosti $R_m = 380 \text{ MPa}$
- mez kluzu $R_p = 250 \text{ MPa}$
- roztažnost $0,2 / 100^\circ\text{C}$

4 Nejčastější provozní poruchy pístů

Písty plochodrážních motocyklů jsou značně náchylné na sebemenší změny, nebo podmínky při provozu. Stačí vniknutí cizích předmětů do mazacího systému, dojde k místnímu přehřátí a na pístu může v provozu dojít k zakousnutí, zadření, proražení, propálení. Také k opotřebením i praskání drážek pro pístní kroužky. K zadření pístů může dojít jednak při záběhu motoru, při náhlém zatížení po startu, ale i za provozu. Většinou je způsobuje nečistý olej, neodstraněné třísky z opracování, písek, ale i vniknutí různých nečistot při nedbalé výměně oleje. Samotný výběr oleje, především jeho parametrů hraje velkou roli. Zadření může způsobit rovněž malá tuhost pístního čepu [4], který se během provozu ovalizuje a způsobené deformace na plášti pístu mohou ve styku s vložkou válce vyvolat přidírání. Nebezpečí zadírání za provozu se zmenší, vybírají-li se při montáži písty a válce podobných geometrických tvarů a zajistí-li se jejich dokonalý styk správným záběrem. Proto je třeba při montáži věnovat i dostatečnou pozornost při proměřování a zkoušení vůlí mezi jednotlivými součástmi pístové skupiny.

Zadření pístu ve válci je důsledkem jeho přehřátí nebo postupného zadírání. Při tom se může přetřhnout ojnicí šroub, píst, nebo i ojnice. K propálení pístu může dojít jak ve dně, tak i v plášti. Jsou-li na dně pístu ostré hrany, výstupky a přechody, které se při zvýšeném

tepelném zatížení zahřívají, může se propálit dno pístu. Zvýšené tepelné namáhání může být způsobeno i chudou směsí paliva. Hlava pístu se může propálit zejména u prvního pístního kroužku, nebo přímo ve středu dna pístu. Vlivem vysoké teploty může dojít k natavení materiálu a tím pak propadnutí dna.

Písty zážehových motorů se propalují nejčastěji vlivem detonací. Při detonacích vznikají na ploše dna pístu důlky, ty postupně rostou a materiál mezi nimi se odlupuje. Vnikne-li tento materiál mezi píst a válec může způsobit zadření pístu.

K poruchám první drážky u pístů z lehkých slitin dochází nejčastěji. Opotřebení první drážky pro pístní kroužek způsobují především různé okysličující látky a značné snížení tvrdosti hliníkových slitin při vysokých teplotách v horní části pístů. Rozrýhování můstku nad prvním pístním kroužkem bývá způsobeno ulomenými kousky karbonu, který se v těchto místech usadil. Tato závada je způsobena zbytečně velkou vůlí v místě můstku. Může se zde pak usazovat silnější vrstva karbonu, která má větší sklon k uvolňování se ve tvaru malých úlomků.

Vertikální trhlina procházející okem pro pístní čep bývá způsobena příliš slabým pístním čepem. Zatížením se slabý pístní čep deformuje do oválu a tlačí v horizontálním směru na stěny oka pro pístní čep. Horizontální trhlina procházející obvykle drážkou pro stírací pístní kroužek je způsobena únavou materiálu, je – li píst v těchto místech poddimenzován.

K prasknutí a vydrolováním můstků mezi pístními kroužky může být způsobováno špatnou montážní vůlí kroužku v drážce, nebo únavovým lomem vzniklým poddimenzováním přechodových zaoblení v drážce.

Na pístu může vzniknout ještě řada další poruch, bývají však způsobeny individuálním problémem na konkrétním motoru. Zde jsou vyjmenovány alespoň základní závady, které se nejčastěji vyskytují a kterých je třeba se vyvarovat.

5 Popis a parametry motoru

Současné typy motorů s neustále rostoucími měrnými výkony se řadí mezi konstrukčně a technologicky



nejnáročnější druhy strojů. Vyznačují se vysokým cyklickým, mechanickým a tepelným namáháním některých součástí. Do takovéto skupiny patří i motory plochodrážních motocyklů.

Hlavní limitující hranicí při plochodrážních závodech je objem motoru do 500cm^3 . Jedná se o jednoválec s vrtáním 90mm, používá se vzduchové i vodní chlazení. Vzduchové chlazení vyniká podstatně jednodušší konstrukcí a celková Obr. 9 Karburátor Jawa 888-16-500 váha motoru je pak o něco nižší. Hlavy válců jsou opatřeny čtyř ventilovou technikou. Maximální otáčky motoru se pohybují okolo hranice 12 000ot/min a tlak ve válci přibližně kolem 9MPa. Pro dosažení maximálního výkonu (Příloha 1) je použito methanolové palivo, které už samo o sobě obsahuje velké množství kyslíku a jeho příprava je realizována v rovnotlakém jednostupňovém karburátoru s plochým šoupátkem (Obr.).

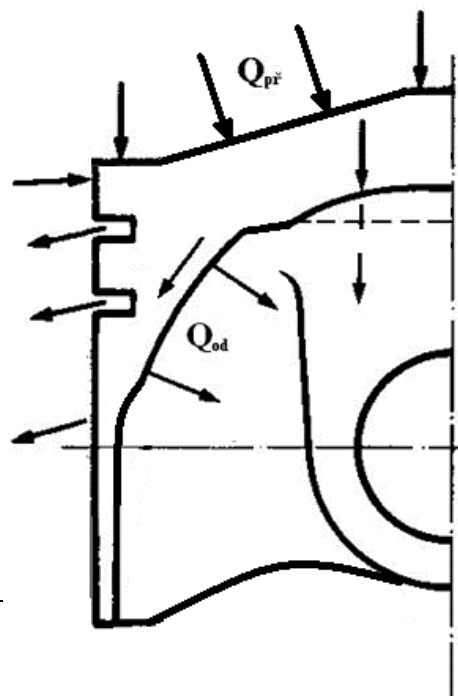
Vzhledem k vyčerpání veškerých možností je cestou dalšího zvyšování výkonu motoru pouze zvyšování otáček, zkvalitnění těsnosti profuků válce, snížení pasivních odporů a celkové zvyšování účinnosti motoru.

Se zvyšováním otáček však dochází k většímu dynamickému namáhání součástí a tudíž je třeba opětně zoptimalizovat jednotlivé komponenty nejen co do pevnosti, kterou značně ovlivňuje i použití správné technologie zpracování, ale i tuhosti materiálů (deformace součástí). Je třeba využít bezrezervy vlastnosti používaných materiálů.

6 Namáhání pístu

6.1 tepelné

Převážná část tepla, které přichází ze spalín do stěn přestupuje do chladicí látky a odvádí se z pracovního oběhu. U rychloběžných motorů závisí na provozních poměrech (zatížení motoru) a na řadě dalších parametrů. Toto tepelné zatížení stěn spalovacího prostoru a válce se zpravidla vyjadřuje hustotou tepelného toku stěnou.



Konstrukce pístu by měla zabezpečit minimální přestup tepla do pístu a současně dosáhnout z něho dobrý odvod tepla. Množství tepla (Obr. 5) přestupující do pístu závisí na teplotě a rychlosti proudění plynu, na době hoření (rychloběžné motory), na termodynamickém vlivu plynů a velikosti plochy dna pístu.

6.1.1 Odvod tepla

Odvod tepla se dá zlepšit:

- dobrou tepelnou vodivostí materiálu
- velké průřezy pro odvod tepla
- chladicí plášť bloku bude proveden po celé drážce kroužků
- chlazení nástřikem oleje na pístu

Odvod tepla záleží na umístění kroužku ve vzdálenosti od dna pístu. Uvažuje se tak, aby při styku s válcem v jeho úrovni se vyskytovala ještě hladina chladicího média. Odvod tepla pístními kroužky je přibližně 62%. Mezi pístními můstky se odvádí přibližně 30% tepla. Pláštěm pístu se pak odvádí přibližně 14%. Záleží však na velikosti stykové plochy, proto jsou zde uvedeny hodnoty jen pro představu. Do klikové skříně pak jde 24%.

Tepelné namáhání je vysoké, proto se musí použít vhodný olej. Nejlépe s nízkou viskozitou stálou při různých tepelných zatíženích a dobrým koeficientem přestupu tepla.

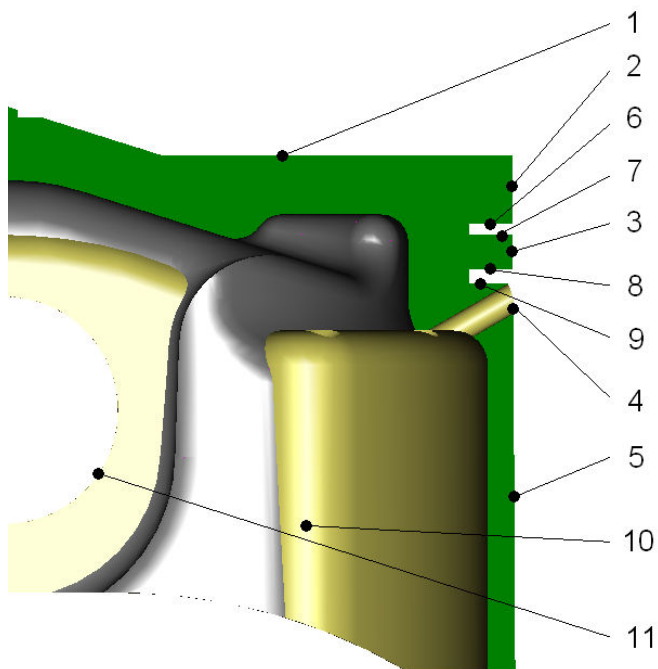
6.1.2 Koeficienty přestupů tepla

Na základě získaného indikátorového diagramu pro maximální zatížení Diesellového motoru je vypočtena poměrná hodnota teploty a provozní součinitelé ve válci [2]. Vyjádřená výměna tepla zůstává ve formě přechodových podmínek terciárního druhu, jak byli původně stanoveny. Charakteristickým plochám jsou přiřazeny teploty okolí prostředí t [°C] a součinitele přestupů tepla α [W/m²K] na teplosměnných plochách dle (tab. 2). V uvedené tabulce jsou také připsány verifikované hodnoty z výpočtového modelu pro píst plochodrážního motocyklu Jawa. (Obr. 6) upřesňuje polohu ploch uvedených v (tab. 2).

tab. 2 Přestup tepla na teplosměnných plochách

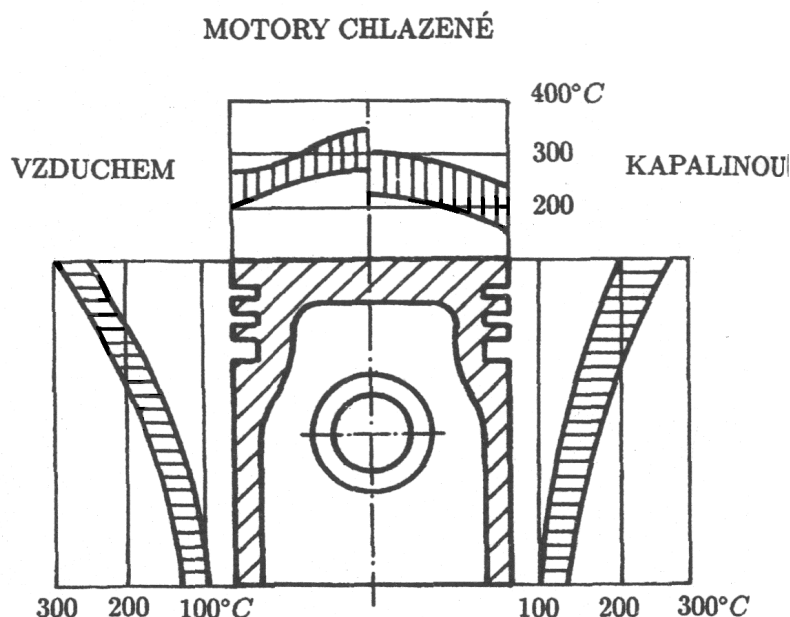
Plocha	Název plochy	Součinitel přestupu tepla		Teplota t [°C]	Teplota t [°C]
		α [W/m ² K]	α [W/m ² K] Jawa odhadnutá		
		Diesel		diesel	Jawa odhadnutá
1	Dno pístu	0.43	3.1	457	500
2	Boční plocha nad I. kroužkem	0.12	0.4	311	317
3	Plocha můstku	0.14	0.2	231	275
4	Plocha pod II. kroužkem	0.14	0.1	211	268

5	Plášť pístu	0.14	0.8	122	170
6	Horní plocha I. drážky	12	6	162	177
7	Dolní plocha I. drážky	15	7	157	172
8	Horní plocha II. drážky	1	1	145	158
9	Dolní plocha II. drážky	1.5	1.2	143	152
10	Vnitřní plocha pístu	0.9	0.9	90	140
11	Plocha vedení pístního čepu	0.9	0.9	117	160



Obr. 6 Zadávané plochy k tabulce 3

(Obr. 7) znázorňuje přibližné rozmístění teplot na plášti a dně pístu. Je dobře patrný rozdíl teplot na povrchu pístu mezi válcem chlazeným vzduchem a válcem chlazeným kapalinou. Nejteplejší místo je ve středu dna pístu, ale může být i poblíž zapalovací svíčky.



Obr. 7 Přibližné znázornění rozložení teplot na pístu [8]

6.2 mechanické namáhání pístu

Na píst působí tlak plynů ve spalovacím prostoru a setrvačné síly vyvozené zrychlením pístu v horní a dolní úvrati. Tyto síly působí současně a sčítají se. Výsledná síla se přenáší dnem pístu, jeho hlavou a nálitky pro pístní čep. Protože působení dynamických sil je značně vysoké, musí být tyto části pístu tak naddimenzovány, aby toto namáhání vydržely.

V horní úvrati působí tlak plynů směrem ke klikové hřídeli a setrvačné síly vyvozené zrychlením a hmotností posuvných hmot pístové skupiny směrem k hlavě válce. Proto se tyto síly od sebe odečítají. Jiná situace ovšem nastane, jestliže v horní úvrati nepůsobí tlak plynů a je právě realizována výměna náplně válce. Potom na píst působí pouze složka setrvačných sil, která je při vysokých otáčkách rozhodně nezanedbatelná. Nezanedbatelná je i složka boční síly F_N . Průběh sil F_m , F_N působících na píst (Příloha 3).

Síla působící na dno pístu $F_m = p \frac{\pi D^2}{4}$ (5), kde p pochází z p-V diagramu.

Přepočet úhlu β $\beta = \arcsin(\lambda \sin \alpha)$. (6)

Síla působící na plášť válce $F_N = \tan \beta F_m$. (7)

Rozkládá se na plášť válce a nabývá svého maxima ve 28° natočení klikové hřídele za horní úvrati hodnoty 3615N.

6.2.1 Otáčky a střední pístová rychlost

Otáčky motoru patří k hlavním parametrům, na kterých závisí celkové i měrné výkony motoru. Proto je žádoucí volit je co možná nejvyšší. Avšak s otáčkami roste mechanické i tepelné zatížení součástí motoru. Rostou setrvačné a odstředivé síly pohybujících se částí klikového mechanismu. Rostou pasivní odpory v kluzných plochách, roste opotřebení a klesá životnost motoru. Setrvačné síly pasivních i rotačních hmotností $F_{m,e}$ jsou úměrné $D^2 c_s^2$ jimi způsobené mechanické zatížení obvykle vyjádřené měrným tlakem na plochu pístu

$$p_m \approx \frac{F_{m,e}}{D^2} \approx c_s^2 \approx \xi^2 D^2 n^2, \text{ roste tedy s } c_s^2. \quad (8)$$

Tomuto zatížení jsou i úměrná mechanická napětí materiálů namáhaných součástek. $\sigma_m \approx p_m$. Aby se tedy nepřekročila přípustná velikost tlaků p_m , musí pro podobné motory platit podmínka $\xi D n = konst.$ přičemž ξ je zdvihový moment (9)

$$z n = konst. \quad \text{přičemž } z \text{ je zdvih} \quad (10)$$

$$c_s = \frac{z n}{30} [ms^{-1}] \quad \text{přičemž } n \text{ je v } [ot \min^{-1}]. \quad (11)$$

Rychloběžné motory mají velkou $c_s > 10 \text{ m.s}^{-1}$, pro plochodrážní motor Jawa dosahuje střední pístová rychlost až $c_s = 31,2 \text{ m.s}^{-1}$. To je poměrně vysoká hodnota, protože u závodních strojů se obvykle hodnota střední pístové rychlosti pohybuje okolo 25 m.s^{-1} .

Jestliže je hranice otáček překročena, je optimalizace konstrukce značně složitá.

6.2.2 Stanovení středního užitečného tlaku p_e

jeho velikost závisí na pracovním oběhu, palivu, dokonalosti a průběhu hoření, tvaru spalovacího prostoru, naplnění válce, kompresním poměru, mechanické účinnosti atd.

Lze stanovit:

- Z hodnot dosažených na podobných motorech rozmezí $p_e = 0,65\text{--}0,95 \text{ MPa}$ i více.

- Ze známé výhřevnosti paliva $p_e = p_i \eta_m = \frac{H_u}{\lambda L_t} \rho \eta_d \eta_i \eta_m$ (12)

- Z p-V diagramu planimetrem určit p_i , pak $p_e = p_i \eta_m$ (13)

- Měřením -> sejmutím indikátorového diagramu – skutečný indikovaný tlak (Příloha 2).
-> Charakteristiky na brzdě z P_e a $n \Rightarrow p_e$.

6.2.3 Kinematika pístu

$$\text{dráha pístu} \quad x = r \left(1 - \cos \alpha + \frac{1}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} \right) \right) \quad (14)$$

$$\text{kde} \quad \lambda = \frac{r}{l} \quad (15) \quad r - \text{rameno kliky}$$

l – délka ojnice

$$\text{v technické praxi se používá} \quad x \cong r \left((1 - \cos \alpha) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\alpha) \right) \quad (16)$$

$$\text{zrychlení} \quad a = r\omega^2 \left| \cos \alpha + \lambda \frac{\cos 2\alpha + \lambda^2 \sin^4 \alpha}{\sqrt{(1 - \lambda^2 \cos^2 \alpha)^3}} \right| \quad (17)$$

$$\text{v technické praxi se používá} \quad a \cong r\omega^2 (\cos \alpha + \lambda \cos 2\alpha) \quad (18)$$

Pro vynesení závislosti zrychlení na dráze

$$\text{přibližně zrychlení v úvrati} \quad \text{horní} \quad a_h = r\omega^2 (1 + \lambda) \quad (19)$$

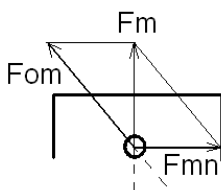
$$\text{dolní} \quad a_d = -r\omega^2 (1 + \lambda). \quad (20)$$

Protože je průběh zrychlení zakřiven do tvaru paraboly vytvoří se ještě pomocný referenční bod $-3r\omega^2\lambda$ (21) a pomocí něj se prokládají spojnice mezi horní a dolní úvratí, až získáme tvar zrychlení.

6.2.3.1 Síly v klikovém ústrojí

Síla F_p od tlaku plynů působí na píst (čep).

Setrvačná síla posuvných částí F_m (Obr. 8) je dána součinem posuvné hmotnosti (pístu, kroužku, pístního čepu, částí ojnice) a zrychlení ve směru jejich pohybu osou válce.



Obr. 8

Způsobuje také klopný moment, který se s ΔM_o přenáší do základů. Účinek setrvačných sil posuvných hmotností je třeba snižovat vyvážením – základní podmínka klidného a tichého chodu motoru.

Současně síla F_m má vliv na užitečný moment, neboť výsledná síla působící na píst je dána součtem síly od tlaků plynů a síly setrvačné. Její vliv je tím významnější, čím rychloběžnější je motor.

ΔM_o :

- přídavný (kompenzační moment)
- jeho velikost plyne z podmínky, aby statické a dynamické účinky náhrady byly rovnocenné vlastní ojnici

6.3 Pevnostní výpočet pístu

Píst je namáhán silami tlaků plynů, setrvačnými silami, tepelným a vnitřním pnutím a jinými silami. Vzhledem ke složitému tvaru pístu a způsobu jeho namáhání je jeho pevnostní výpočet velmi složitý a prakticky neproveditelný. Proto se v dnešní době využívá výpočtů pomocí metody konečných prvků.

7 Pevnostní analýza

7.1 Teplotní analýza

Na modelu pístu je třeba nejprve provést teplotní analýzu. Zadal jsem tedy teploty a součinitelé přestupu tepla α na teplosměnné plochy. Pro první výpočet a odhad výsledků je třeba použít orientační hodnoty teplot a jejich přestupů tepla. Proto jsem použil hodnoty pro Dieselový motor dle (tab. 2).

Zkušební píst Jawy byl osazen tavnými tělísky v osmi měřících místech na plášti pístu (Obr. 10), (Obr. 9). Po krátkodobém provozu při různých režimech zatížení byl píst opět demontován. Zpětnou analýzou tavných tělísek, které zaznamenaly maximální teploty byly zjištěny následné hodnoty (tab. 3).

tab. 3

Měřicí místo	Teploty tavných tělísek t [C]
1	315
2	270
3	325
4	260
5	290
6	260
7	295
8	260

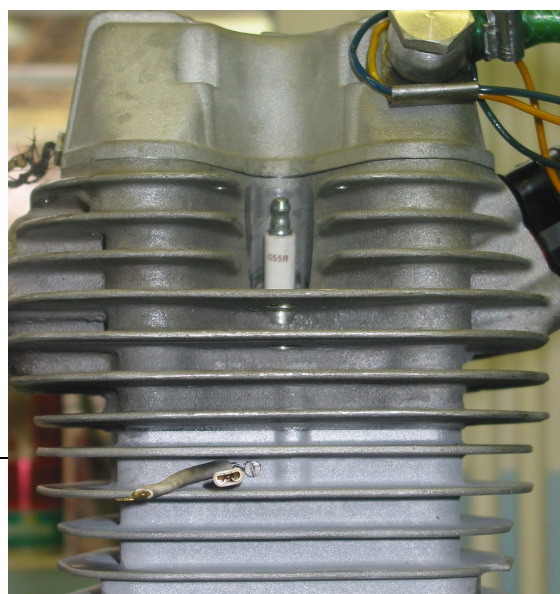


Obr. 10 Měřicí místa na straně sání



Obr. 9 Měřicí místa na straně výfuku

Měření teplot bylo zároveň zjišťováno pomocí termočlánků GG-K-24 v hlavě válce (Obr. 11) a na válci (Obr. 12).



Obr. 11 Snímač teploty v hlavě válce

Obr. 12 Snímač teploty na válci

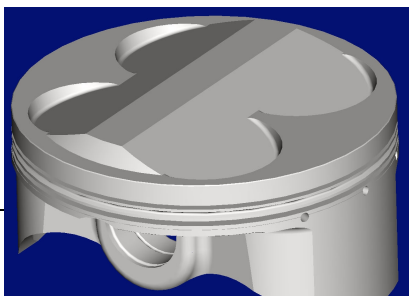
Důležitá je také teplota oleje měřená na vstupu do klikové skříně, která se při závodě pohybuje mezi 130 – 140 °C. Podle ní je třeba upravit koeficienty α a teploty na zadávaných plochách 10 a 11.

Z prvních výsledků rozložení teplot na pístu, kde se zobrazila mapa teplotních polí, je zřejmé, že hodnoty v měřených bodech vůbec neodpovídají hodnotám, které vykázaly tavná tělíska. Hlavní problém vzniká v koeficientu α na teplosměnné ploše dna pístu. Podle Eichelberga se pohybuje hodnota koeficientu α do 1700 W/m²K a u Woschniho ještě u nižších hodnot $\alpha = 1580$ W/m²K.

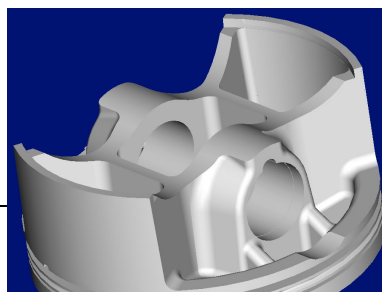
Podle posledních výzkumů, provedených Bargendem, se však jeho hodnoty pohybují přes dvojnásobek hodnot, okolo $\alpha = 3700$ W/m²K. Bargendeho vztah poskytuje věrohodnější hodnoty součinitele přestupu tepla především v oblasti za horní úvratí při hoření směsi, kde dochází k výraznému nárůstu velikosti součinitele přestupu tepla (Příloha 4). Toto zvýšení hodnot součinitele přestupu tepla závisí z velké části na teplotě spalín a tlaku ve válci.

8 Zhotovení modelu

Pro konstrukci modelu je použitý objemový modelář Pro/Engineer. Jedná se o parametrický model, který je vytvořen podle konstrukčních zásad, které jsou uvedeny v kapitole 5. Jedná se o výkovek. Při kreslení byli zohledněny výrobní postupy, aby bylo možné píst nakovat do zápustky. Pro kování je charakteristické minimum dokončovacích operací třískovým obráběním, po této operaci se obrábějí pouze funkční plochy. Při návrhu konstrukce je brán zřetel na kování (Obr. 13), (Obr. 14).



Obr. 13 Model pístu Jawa shora



Obr. 14 Model pístu Jawa zdola

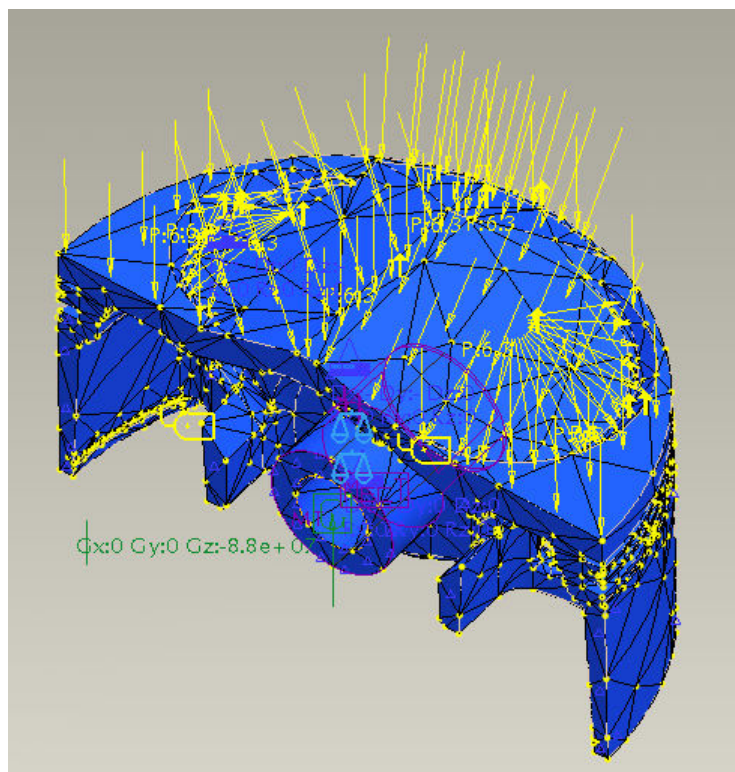
9 Výpočet proveden pomocí metody konečných prvků.

Celkový výpočet se odehrává v prostředí softwaru Pro/Mechanica. Chceme-li správně zadat okrajové podmínky, aby se model choval jako ve skutečnosti, je třeba sestavit parametrickou sestavu v prostředí Pro/Engineer. Sestava obsahuje vyšetřovaný model pístu, k němu přibude pístní čep, 1/3 ojnice, ojnicí pouzdro a hlavně také část válce. Ojnice však není v tomto případě sestavena kolmo na osu válce, jako v horní úvratí, ale je o malý úhel natočena z důvodů maximálního tlaku ve válci, který se nenachází přímo v horní úvratí natočení klikového hřídele. Tato hodnota se projeví i ve zvětšení složky boční síly. Jedná se ale o tak malou hodnotu, že je možné ji pro zjednodušený výpočet zcela vypustit a ojnici ponechat kolmo ve směru osy válce.

Vzhledem k tomu, že je píst díky rozdílným vybráním pro sací a výfukový ventil nesymetrický použil jsem pro zjednodušení výpočtu pouze poloviční model. Celý model včetně správných jednotek jsem pak převedl do prostředí Pro/Mechanicky.

Je třeba si ovšem uvědomit, že model je tužší než reálný píst a vypočtené hodnoty napětí a deformací jsou o něco nižší než ve skutečnosti! Zcela přesný výpočet je nereálný, stupeň konvergence by se pak musel pohybovat do 1% přesnosti výsledků a bylo by zapotřebí daleko vyššího stupně polynomu a času pro jeho výpočet.

Pro/Mechanica používá pro svůj výpočet P-metodu, to znamená, že její síť je podstatně jednodušší a její hrany jsou složeny z polynomických rovnic (Obr. 15). Při průběhu výpočtu se každá hrana počítá zvlášť a když splní podmínku přesnosti konvergence výpočtu do stanoveného limitu, již se s ní v dalším kroku nadále nepočítá. Proto by tato relativně nová metoda měla být rychlejší než H-metoda.



Obr. 15 Síť konečných prvků používaná P-metodou

9.1 Příprava numerického modelu

Pro/Mechanika používá dva režimy analýz - Mechanics Structure
- Mechanics Thermal.

Nejprve je třeba začít teplotní analýzou, kterou později použijeme pro společný výpočet s pevnostní analýzou. Prostředí Mechanics Thermal obsahuje spoustu ovládacích prvků, které ve své práci dokonale popsal Ing. Lusk [5]. Použijí se však okrajové podmínky pouze pro zadávání přestupů tepla a teploty součástí.

9.1.1 Zadávání materiálů

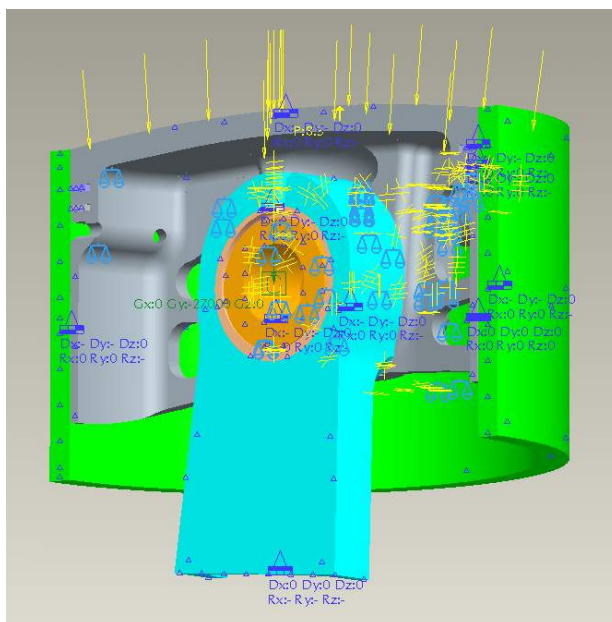
Nejprve je třeba z knihovny materiálů přiřadit správný materiál každé součásti. Proto jsem modům válec, ojnice a pístní čep přiřazen materiál z materiálové knihovny Steel. Ojničnímu pouzdru přiřadil materiál Bronze. Pro píst jsem zadal materiál podle materiálového listu ČSN 42 4218 slitina Al Cu2 Mg Ni. Popis souhlasí s materiálem z kterého se píst vyrábí.

9.1.2 Okrajové podmínky

V dalším kroku je třeba zadat podmínky symetrie vybrání všech ploch dělicí roviny, kterou je píst rozpůlen. Podle souřadného systému jsem vybral osu kolmou na dělicí rovinu a v jejím smyslu jsem zabránil posuvu. Rotace se zamezí v odlišných osách.

Další podmínka je zafixovat říznuté části ojnice ve všech směrech, stejně jako je nehybná část válce.

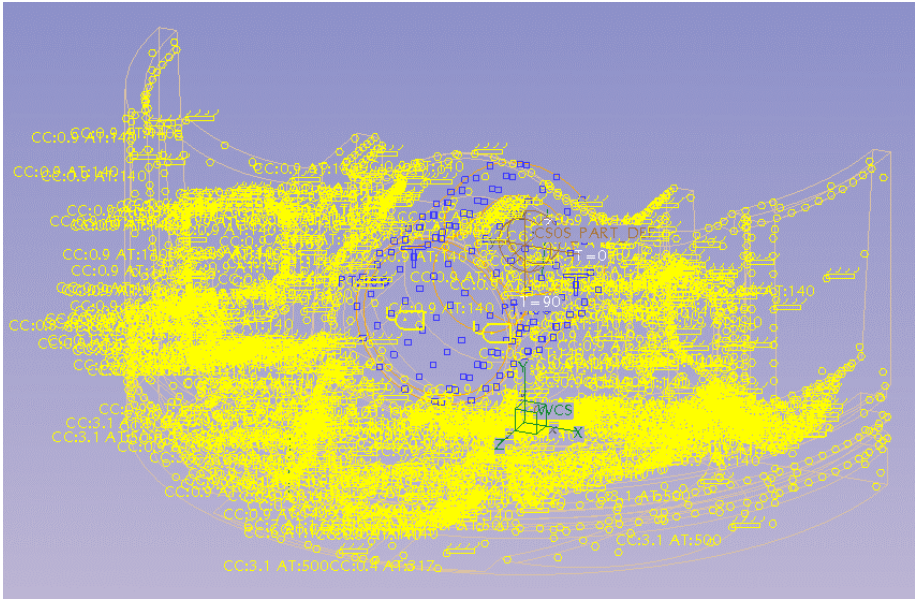
Následujícím krokem je vytvoření kontaktních vazeb mezi jednotlivými součástmi. Je třeba vytvořit kontakt mezi válcem a pístem, pístem a pístním čepem, pístním čepem a bronzovým pouzdem a však kontakt mezi pouzdem a ojnicí se z hlediska zjednodušení nepoužívá a Pro/mechanica ho chápe jako by součásti byli k sobě pevně svařené (Obr. 16).



Obr. 16 Okrajové podmínky v prostředí Pro/Mechanica Structure

Posledním krokem je zadání teplot a koeficientů přestupů tepla α . Vybral jsem jednotlivé skupiny ploch tak jak jsou uvedeny v (tab. 2) a přiřadil jim zmiňované hodnoty (

Obr. 17). Na obrázku je patrné, že zadané podmínky jsou dosti nepřehledné. Je to z důvodu, že je píst značně členitý. Některé komponenty z důvodů přehlednosti jsem pro jistotu ani nezobrazoval.



Obr. 17 Okrajové podmínky přestupů

Ostatním součástem jsem přiřadil přibližné hodnoty teplot uvedené v (tab. 4).

tab. 4

Součást	Zadaná teplota t [°C]
Pístní čep	160
Ojniční pouzdro	165
Ojnice	170
Válec	210

9.1.3 Rozbor výsledků

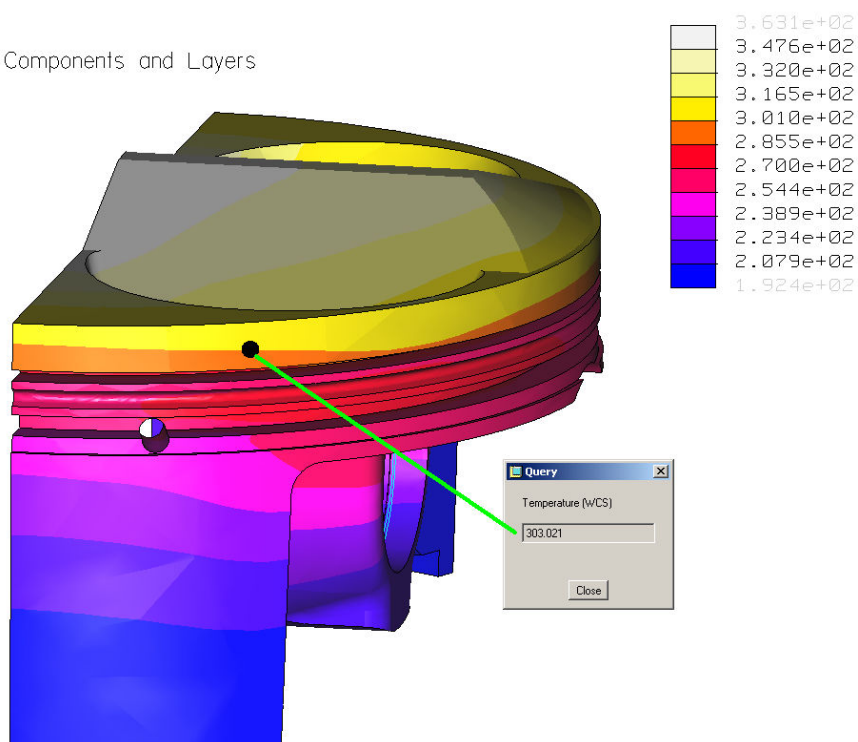
Vytvořil jsem novou zjednodušenou analýzu Quick_Check a spustil výpočet. Při zobrazování výsledků nám postačí pouze zobrazení samostatného pístu s teplotními poli. Pomocí funkce Dynamic query zjišťuji hodnoty v měřených místech. Jestliže se hodnoty teplot liší, je třeba upravit koeficienty a opakovat výpočet dokud se výpočtové hodnoty nezačnou blížit změřeným teplotám na pístu. Po verifikaci modelu odladování teplot i koeficientů α vychází teploty v měřicích místech přibližně stejné v toleranci ± 10 °C. Odladěné hodnoty jsem uvedl v (tab. 2).

Na **(Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.)** a **(Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.)** jsou
zobrazeny odladěné teplotní pole tak, aby se co nejvíce přibližovali reálným hodnotám.

Query na (Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.), (Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.)
zobrazuje hodnoty v měřených místech.

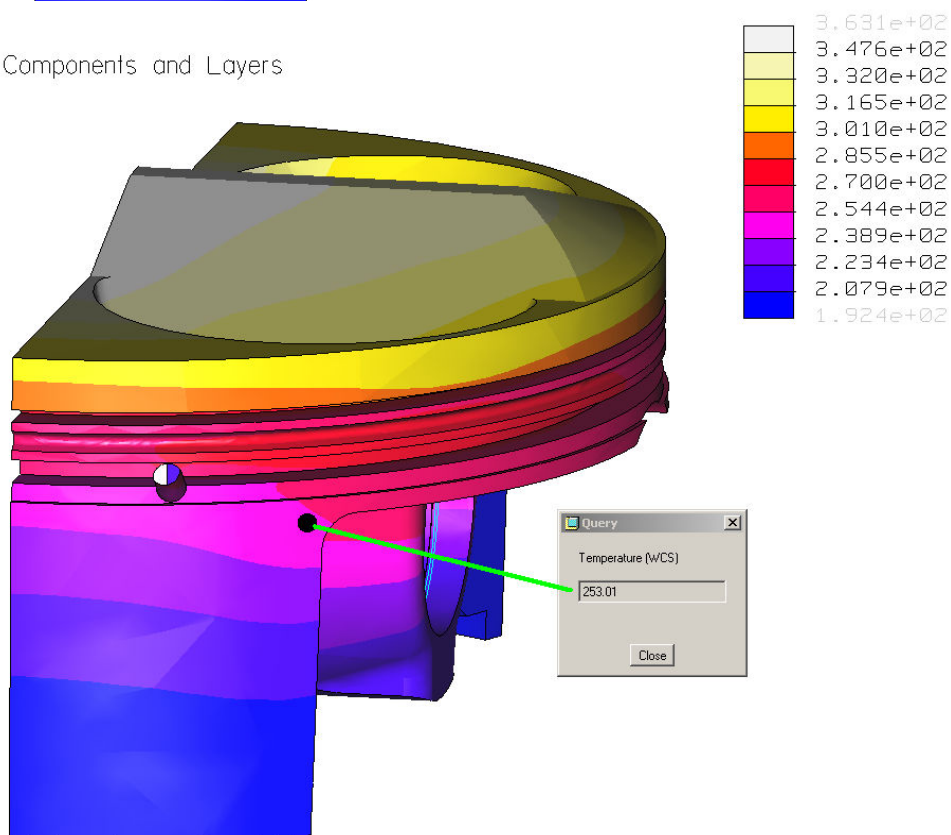
Temperature (WCS)
(C)

Deformed Location: Components and Layers



Temperature (WCS)
(C)

Deformed Location: Components and Layers



Obr. 19 Teplotní pole, odladěný model - měřené místo 2, 4, 6, 8

9.2 Příprava numerického modelu STRUCTURE

Úprava modelu pro mechanické namáhání se provede přepnutím Pro/Mechanicky do režimu Structure a doplní se mechanické okrajové podmínky (Obr. 16).

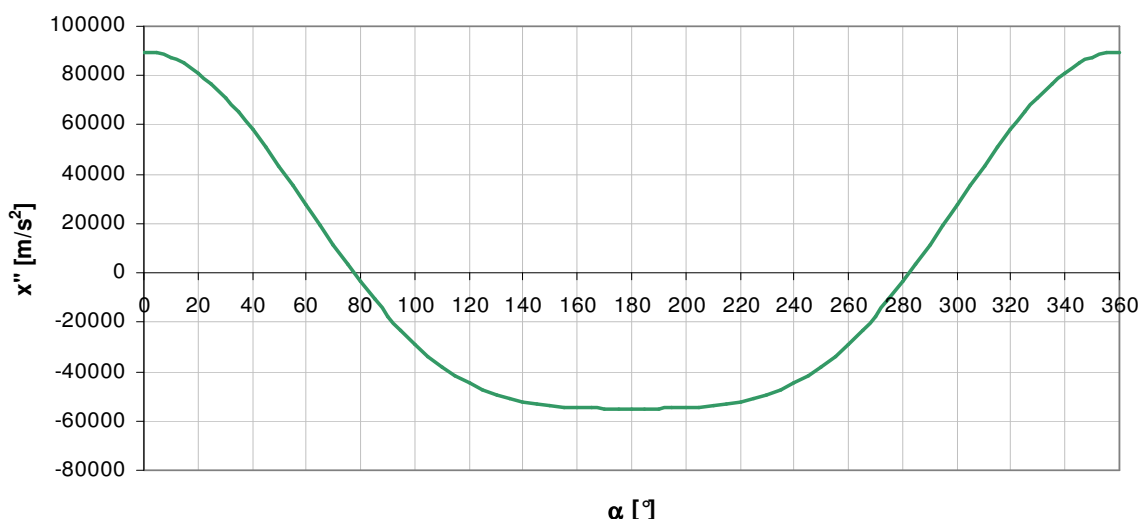
9.2.1 Okrajové podmínky STRUCTURE

V Pro/Mechanics Structure je možné zadávat podmínky zatížení tlakem a to na bod, po křivce, nebo na plochu.

Použil jsem podmínku plošného zatížení výběrem postupného označováním ploch celého dna pístu (Obr. 16). Po té se zadá velikost tlaku podle p-V diagramu (Příloha 2) z hodnoty otáček pro maximální kroutící moment. Je třeba si uvědomit, že maximální tlak ve válci se nenachází přímo v horní úvratí klikového hřídele, ale podle p-V digramu nepatrně za, přibližně 4-8° za horní úvratí. Tato hodnota samozřejmě záleží na časování předstihu zážehu měřeného motoru.

Je třeba dávat dobrý pozor na používané jednotky, jestliže používáme soustavu jednotek [mm, tuny, N, s, °C] zadáváme pak hodnoty tlaku přímo v MPa.

Další důležitou podmínkou je zadání zrychlení celé soustavy. Z digramu zrychlení (Obr. 20) jsem vybral hodnotu pro příslušné natočení klikové hřídele, odpovídající maximálnímu tlaku ve válci.



Obr. 20 Průběh zrychlení pístu ve válci

9.3 Vlastní pevnostní výpočet

9.3.1 Deformace pístu od teploty

Pro vlastní pevnostní výpočet se vytvoří v režimu Structure nová sada zatížení, do které jsem zahrnul předchozí teplotní výpočet. Vytvořil jsem novou analýzu, do které se vybere sada zatížení od teplotního výpočtu. Po té jsem zvolil stupeň polynomu a velikost do které má hodnota konvergovat.

Takto připravený výpočet jsem spustil a z jeho výsledků získal velikosti teplotních deformací pro píst. (Příloha 5).

9.3.2 Pevnostní analýza pístu

Vytvořil jsem novou analýzu, do které jsem vybral sadu mechanických zatížení od tlaků plynů ve válci a zrychlení soustavy. Zatrhnul jsem výpočet s kontaktními vazbami, vybral jsem maximální stupeň polynomu a 10% velikost konvergence, která se obvykle používá. Takto připravený výpočet se spustí a z jeho výsledků pak můžeme vyčíst velikost a průběhy maximálních napětí (Příloha 6).

Je ovšem třeba si uvědomit, že píst se během pracovního cyklu výměny obsahu válce nachází v horní úvratí, aniž by na něj působily síly vyvozené od tlaků plynů. Je vystaven pouze

působení setrvačných sil, které ovlivňují všechny posuvné hmoty. Vzniká tak cyklické únavové namáhání.

Proto je třeba ještě vytvořit novou analýzu, která tento vliv zohlední. Na výpočtovém modelu se potlačí vliv sil od tlaků plynů. Vypnul jsem zadaný tlak na dno pístu. Nastavení analýzy jsem provedl stejně jako v prvním kroku a opět se nechal proběhnout výpočet. Výsledky deformací a napětí jsou zobrazeny v přílohách 7, 8.

9.3.3 Celková analýza pístu

Pro celkový výpočet se vytvoří nová analýza, do které jsem vybral nejen sadu zatížení od tlaků plynů ve válci a zrychlení modelu, ale také sadu teplotního zatížení.

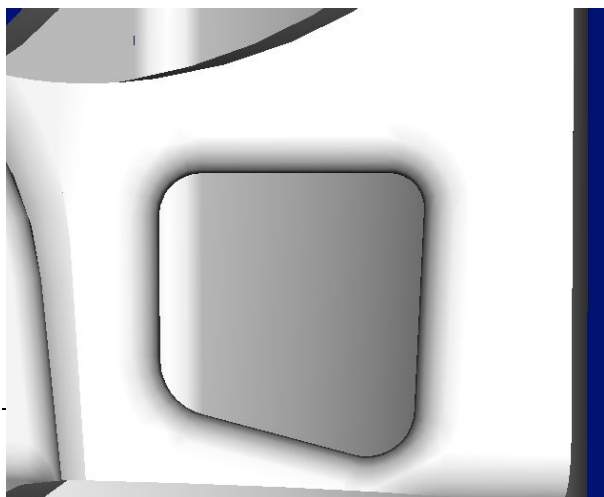
Znovu se vybere maximální stupeň polynomu s hodnotou konvergence do 10% správnosti výsledků. Opět se spustí výpočet pro ověření výsledků hodnot napětí a deformací modelu pístu.

9.4 Upravená varianta pístu

Jestliže chceme zlepšit současný model a vylepšit tak vlastnosti stávajícího pístu, je třeba si pečlivě prohlédnout pevnostní a deformační analýzy vypočteného modelu a zaměřit se na místa v pístu u kterých nevznikají vysoká napětí nebo deformace. Je třeba posoudit, zda tato místa nebo plochy nemají vliv na funkci pístu. Jako například z hlediska montáže na různé dosedací a opěrné plochy, případně výztuhy pístu. Pak je možné navrhnout a zkonstruovat jejich reálné úpravy.

Po prohlédnutí jsem nenašel v propojení mezi pístním čepem a pláštěm žádné špičky, nebo

vysoké koncentrace napětí. Proto je vhodné tyto plochy odlehčit vhodným vybráním materiálu se zaoblenými kraji. Na modelu jsem vytvořil tzv. okénka (Obr. 21), (Obr. 22).



Obr. 22 Odlehčení pístu čelní pohled



Takto upravený píst je třeba opět podrobit všem analýzám tak, jak jsou již popsány v kapitolách 9.3.1 až 9.3.3.

10 Diskuse výsledků

Veškeré velikosti a výsledky napětí jsou v přílohách zobrazovány jako hlavní napětí, neboli největší napětí na Mohrově kružnici pro tříosou napjatost. To znamená, že jsou na modelu současně zobrazeny místa namáhaná na tah i tlak.

Výpočet ukázal, že v případě zjišťování deformací od teploty vychází největší roztažnost pístu v oblasti nad prvním těsnícím kroužkem a to 3,38 mm (Příloha 5).

Jak je vidět z teplotního pole pístu na obrázku (Příloha 9), v porovnání s teplotním polem dodané analýzy Jawou Divišov a.s. (Příloha 10), která je vypočtena v programu Ansys, vychází hodnota $t = 347^{\circ}\text{C}$ a Pro/Mechanica hodnotou $t = 362^{\circ}\text{C}$. Rozdíl hodnot je 15°C , to může být způsobeno odlišným zadáním maximální teploty pro povrch dna pístu, případně jinými koeficienty přestupů tepel. Hodnota se nachází zhruba v toleranci, takže teplotní pole pístu vychází přibližně stejné.

Dále jsem uvedl naznačené deformace v programu Ansys a to pro plné zatížení od tlaků plynů (Příloha 11) a pro zatížení setrvačnými silami (Příloha 12). Těmto stavům odpovídají výsledky velikosti napětí s působením tlaků plynů (Příloha 13) a působením pouze setrvačných sil (Příloha 14). Jestliže se porovnají hodnoty napětí a místa průběhů napětí s Pro/Mechanicou, zjistil jsem, že hodnoty v místech maximálních napětí se přibližně liší o 17MPa. To je zřejmě dáno odlišností výpočtového systému, protože průběhy při nastavení

stejných stupnic rozlišení si jsou podobné. Program Ansys používá k svému výpočtu H-metodu, tedy klasickou síť konečných prvků jak je vidět v Příloze 11,12.

Na upraveném modelu výpočet potvrdil, že odlehčení ve tvaru „okének“ nijak zvlášť neovlivnilo maximální napětí a v modelu se ani nikde nevytvořila nová místa koncentrací napětí. Pro variantu kdy je píst zatížený od tlaků plynů a současně namáhán dynamickými silami od zrychlení, vychází jeho maximální hodnota napětí 185 MPa. Kritické místo je zobrazeno v Příloze 16. Ostatní průběhy napětí k tomuto výpočtu jsou pak zobrazeny v přílohách 15 a 17. Napětí v „okénkách“ vychází přibližně 92 MPa a je zobrazeno v příloze 17. Varianta výsledků, kdy je pístová skupina vystavena pouze působení setrvačných sil od zrychlení je zobrazena v příloze 18, 19. Maximální napětí v tomto případě dosahuje hodnoty 142 MPa a nachází se v oblasti pístního čepu (Příloha 18). Napětí v „okénkách“ vychází přibližně 98 MPa a je zobrazeno v příloze 19.

11 Závěr

Nová úprava pístu přinesla odlehčení stávajícího pístu o 10g. Je to sice malá hodnota, ale snížila nám namáhání pístu od setrvačných sil a změnila průběh napětí v pístu. Zvýšené napětí se v okénkách projevilo převážně v zaobleních přechodových hran přičemž záleží na druhu namáhání..

Ve vypočítaných analýzách se na modelu vyskytují špičky napětí, které jsou způsobeny singularitami na ostrých hranách a přechodech. Ve skutečnosti se tak vysoká napětí v těchto místech na pístu nevyskytují. Pro jejich odstranění nebo snížení je dobré přechodové hrany zaoblit. Výpočet pak trvá delší dobu, protože je v těchto místech jemnější síť.

Navrhování a odlaďování koeficientů pro teplotní analýzu, bylo poměrně náročné. Při změnách koeficientů přestupu tepla se měnila hodnota teploty v měřených místech jen nepatrně. Obzvlášť náročné bylo nastavování měřicího místa (Obr. 19) kde se rozdíl hodnot měření liší až o 7°C. Naštěstí jsou hodnoty měřících tělísek pouze orientační, vzhledem k tomu, že zaznamenávají v místech pouze nejvyšší teplotu. Je možné, že došlo k částečnému přehřátí motoru a tato hodnota se zaznamenala. Rozptyl teplot od měření se pohybuje v rozmezí $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Z důvodů vysokých tepelných namáhání pístu bych doporučoval chladit spodní část dna pístu nástřikem oleje.

Výpočet po změnách koeficientů přestupu tepla trval přibližně 10 min. Ovšem celkový výpočet s kontaktními vazbami běžel poněkud déle, zhruba 2 dny. Proto jeho odladování bylo poměrně náročné na čas. Při posuzování výsledků bych zmínil, že Pro/Mechanica není příliš vhodná pro takové to náročné úlohy. Její problémem vzniká v kontaktních vazbách, které se nedají příliš dobře nadefinovat a v mnoha případech docházelo při zobrazení deformací k chybě ve formě prŮniků součástí. Důležité je zmínit, že při opakované tvorbě kontaktů tvořila Pro/Mechanica odlišné vazby na stejných součástech. Lišily se pak i výsledky při používání stejných okrajových podmínek.

Při výpočtu celkové analýzy kombinace teplotního a mechanického zatížení nebyl schopen software Pro/Mechanica výpočet provést včetně kontaktních vazeb. Po provedení standardního výpočtu bez kontaktu vycházely nevyhovující výsledky, proto je zde neuvádím. Pro stanovení celkového maximálního napětí na pístu v různých režimech tepelného i mechanického zatížení je třeba obě analýzy porovnat. Vyskytuje-li se špička napětí ve stejném místě na modelu musí se hodnoty maxim sečíst. To je pak výsledné napětí. V tomto případě nedošlo k protnutí špiček napětí a hodnoty maxim zůstávají stejné, jak je uvedeno v přílohách.

Píst by bylo třeba ještě spočítat na životnost cyklickým namáháním. Vynesením maximálních hodnot napětí do Smithova diagramu pro varianty od tlak plynů a od zrychlení. Určíme pouze střední hodnotu napětí 164,5 MPa. Pro celkové stanovení cyklické únavy je třeba znát přesné údaje o materiálu, aby se dalo určit σ_{c*} . Hodnoty se zjistí ze zkušební vzorku vyříznuté části pístu s následným rozbořem. Tyto údaje se mi však pro kovaný materiál nepodařilo získat.

Splnění cílů

Veškeré cíle diplomové práce byly splněny v plném rozsahu jak jsou uvedeny v kapitole 1.1. Píst je možné v této úpravě vyrobit a dle vypočtených údajů by měl být zajištěn jeho bezproblémový provoz.

11.1 Použitá literatura

- [1] Kožoušek, J.: Výpočet a konstrukce spalovacích motorů I, SNTL, Praha 1983
- [2] KOLBENSCHMIDT AG, Neckarsulm: Kolen für PKW- und NKW- motoren. Kapitel 1: Grundlagen
- [3] KOLBENSCHMIDT AG, Neckarsulm: Kolen für PKW- und NKW- motoren. Kapitel 2: Gestaltung des Kolbens
- [4] KOLBENSCHMIDT AG, Neckarsulm: Kolen für PKW- und NKW- motoren. Kolbenschaden
- [5] Lusk Z.: Tepelná roztažnost pístu spalovacího motoru, Diplomová práce, Liberec 2003
- [6] Kovařík, Ladislav. Konstrukce vozidlových spalovacích motorů, Naše vojsko, Praha 1992
- [7] Sborník přednášek.: XXXIV Mezinárodní konference kateder a pracovišť spalovacích motorů českých a slovenských vysokých škol, TUL – KVM, KOKA 2003
- [8] KONIG Elko: Technisches handbuch – Technical manual, Rankweil/Austria 1991

11.2 Internetové zdroje

- [10] www.almet.cz
- [11] www.Jawa.cz
- [12] www.Mahle.com
- [13] www.Metal.cz
- [14] www.Kolbenschmidt.cz

12 Přílohy

Příloha 1 Výkon plochodrážního motoru

Příloha 2 Naměřený průběh p-V digramu motoru Jawa

Příloha 3 Ukázka průběhů sil působících na píst

Příloha 4 Průběh koeficientů α pro dno pístu v závislosti na natočení klikového hřídele

Příloha 5 Deformace pístu od teploty

Příloha 6 Průběh napětí při zatížení tlakem a setrvačnými silami

Příloha 7 Deformace pístu způsobené setrvačnými silami

Příloha 8 Průběh napětí od setrvačných sil

Příloha 9 Teplotní pole pístu

Příloha 10 Teplotní pole vytvořené v programu Ansys

Příloha 11 Deformace způsobené od tlaků plynů program Ansys

Příloha 12 Deformace způsobené setrvačnými silami program Ansys

Příloha 13 Průběh napětí při působení tlaků plynů program Ansys

Příloha 14 Průběh napětí v pístu zatíženého setrvačnými silami program Ansys

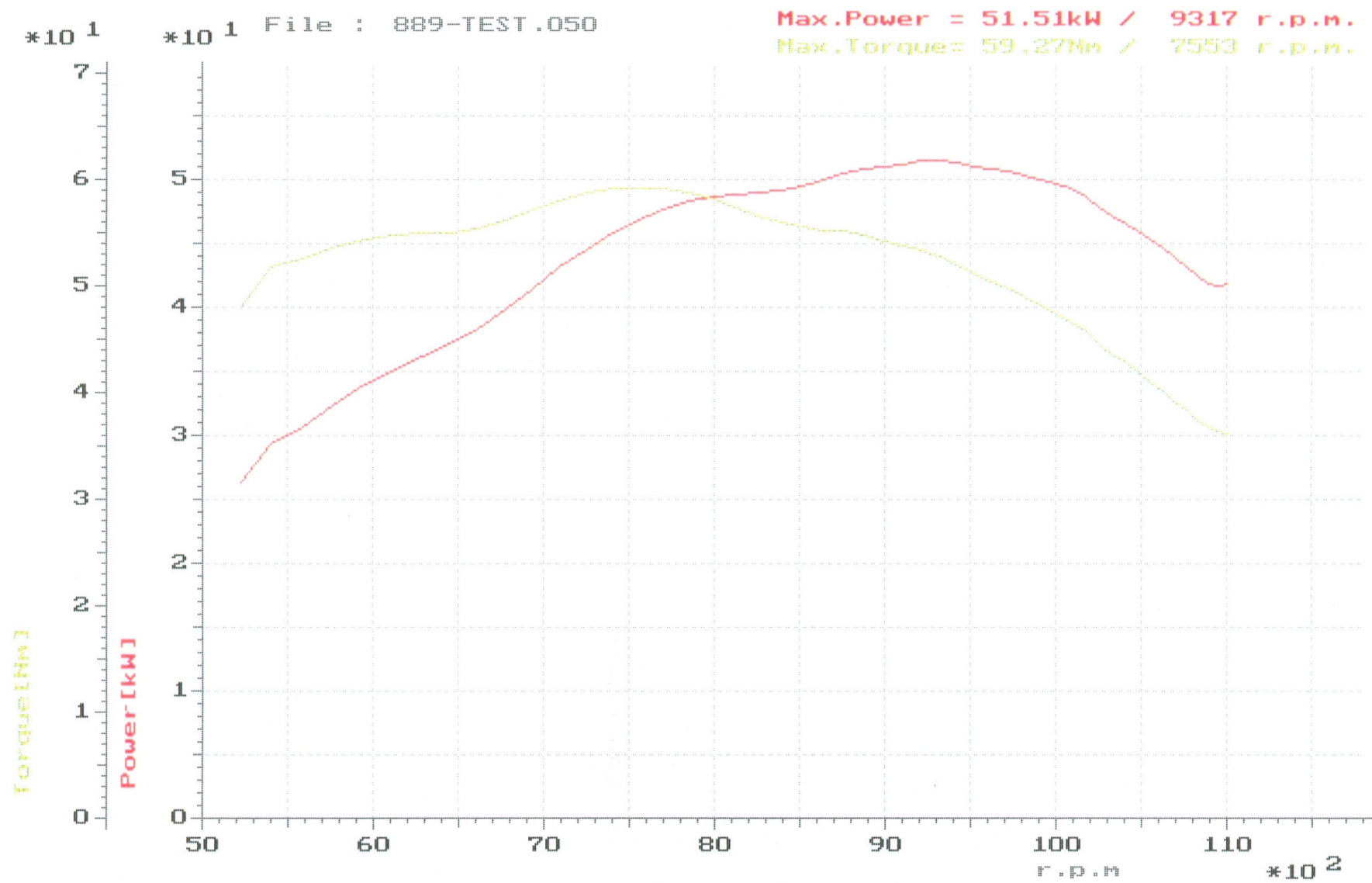
Příloha 15 Průběh napětí se zatížením od tlaků plynů

Příloha 16 Průběh napětí se zatížením od tlaků plynů

Příloha 17 Průběh napětí se zatížením od tlaků plynů - namáhání v odlehčeních

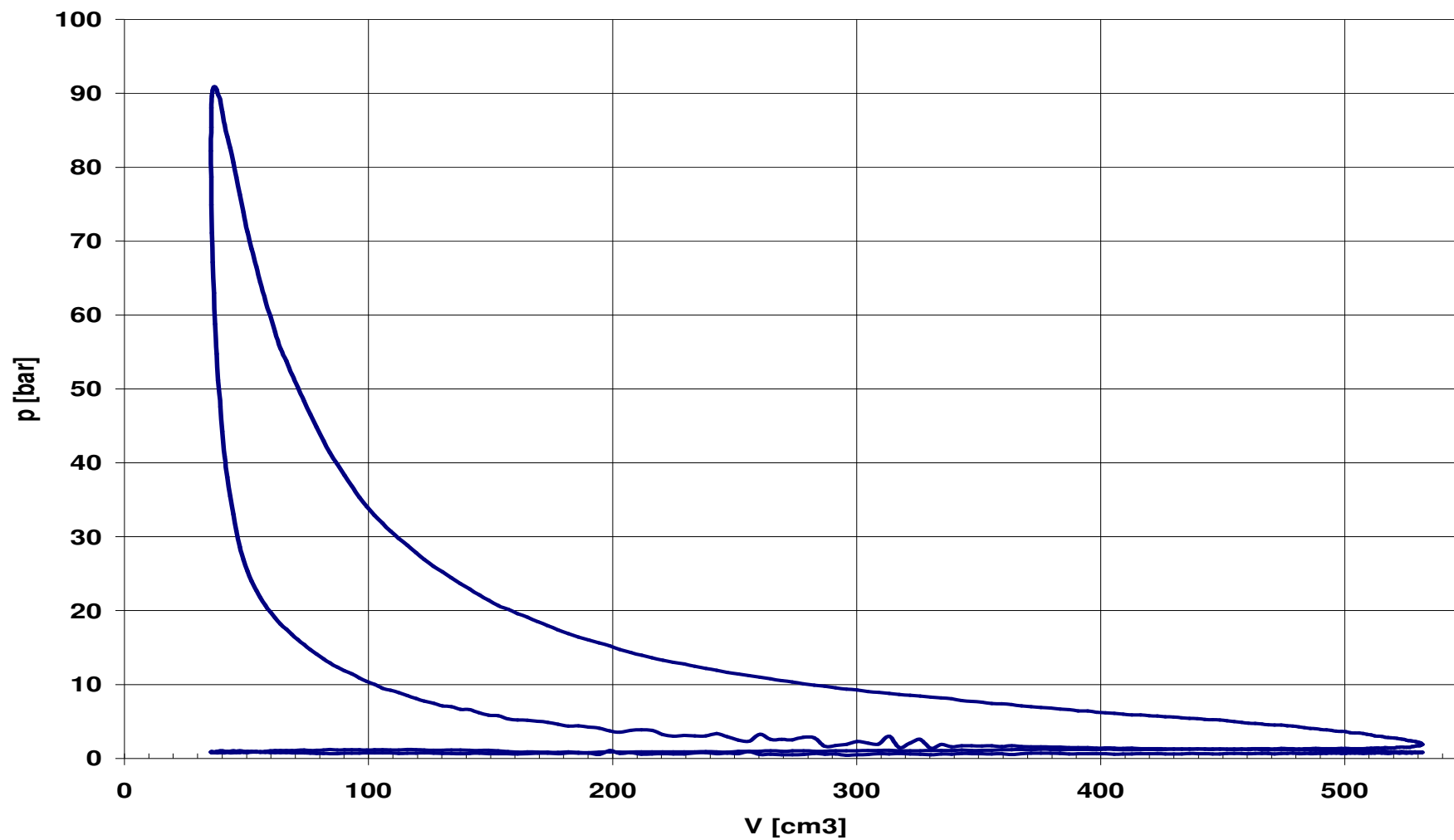
Příloha 18 Průběh napětí od setrvačných sil upravený model

Příloha 19 Průběh napětí od setrvačných sil upravený model



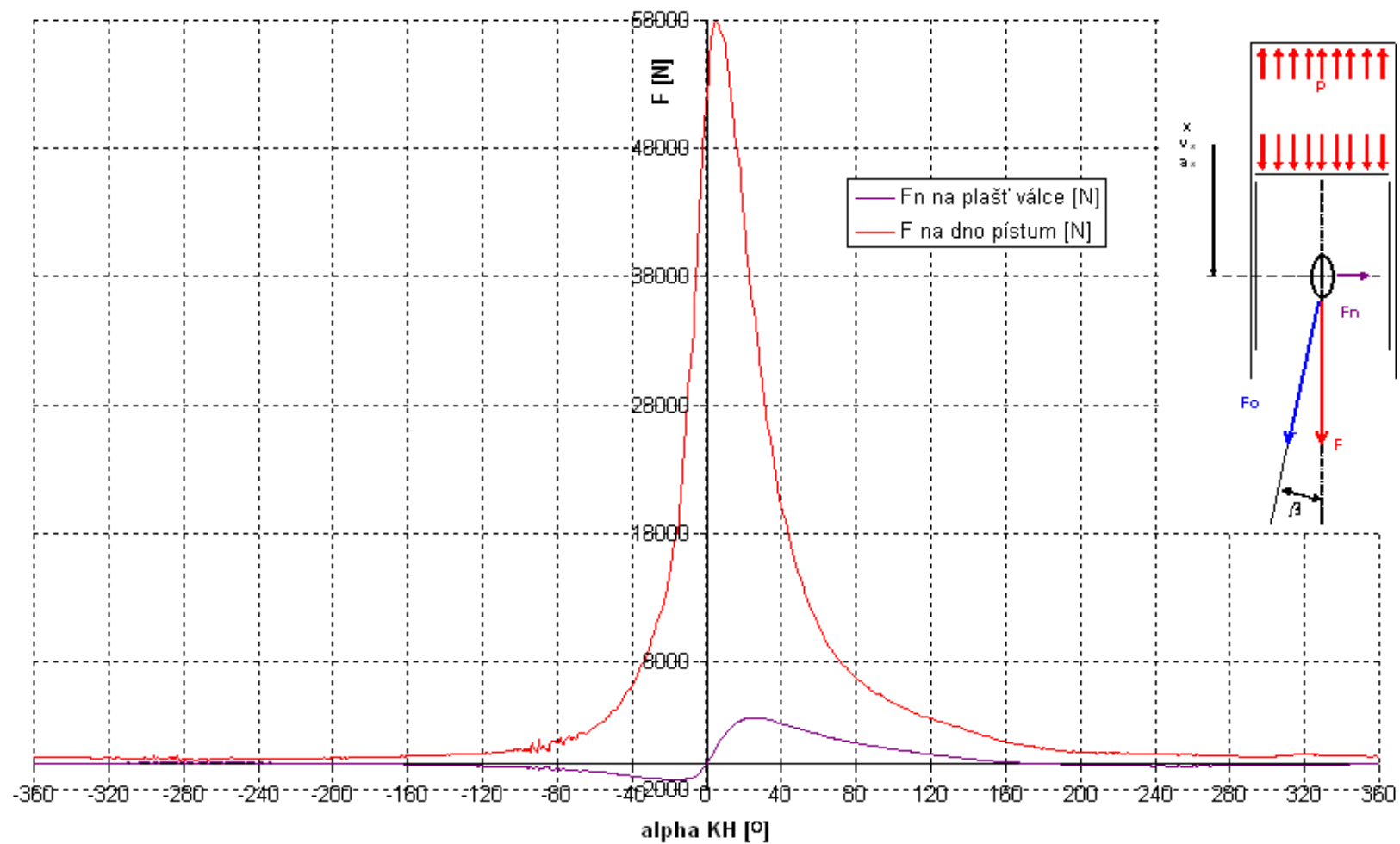
Příloha 20 Výkon plochodrážního motoru

p-V Diagram

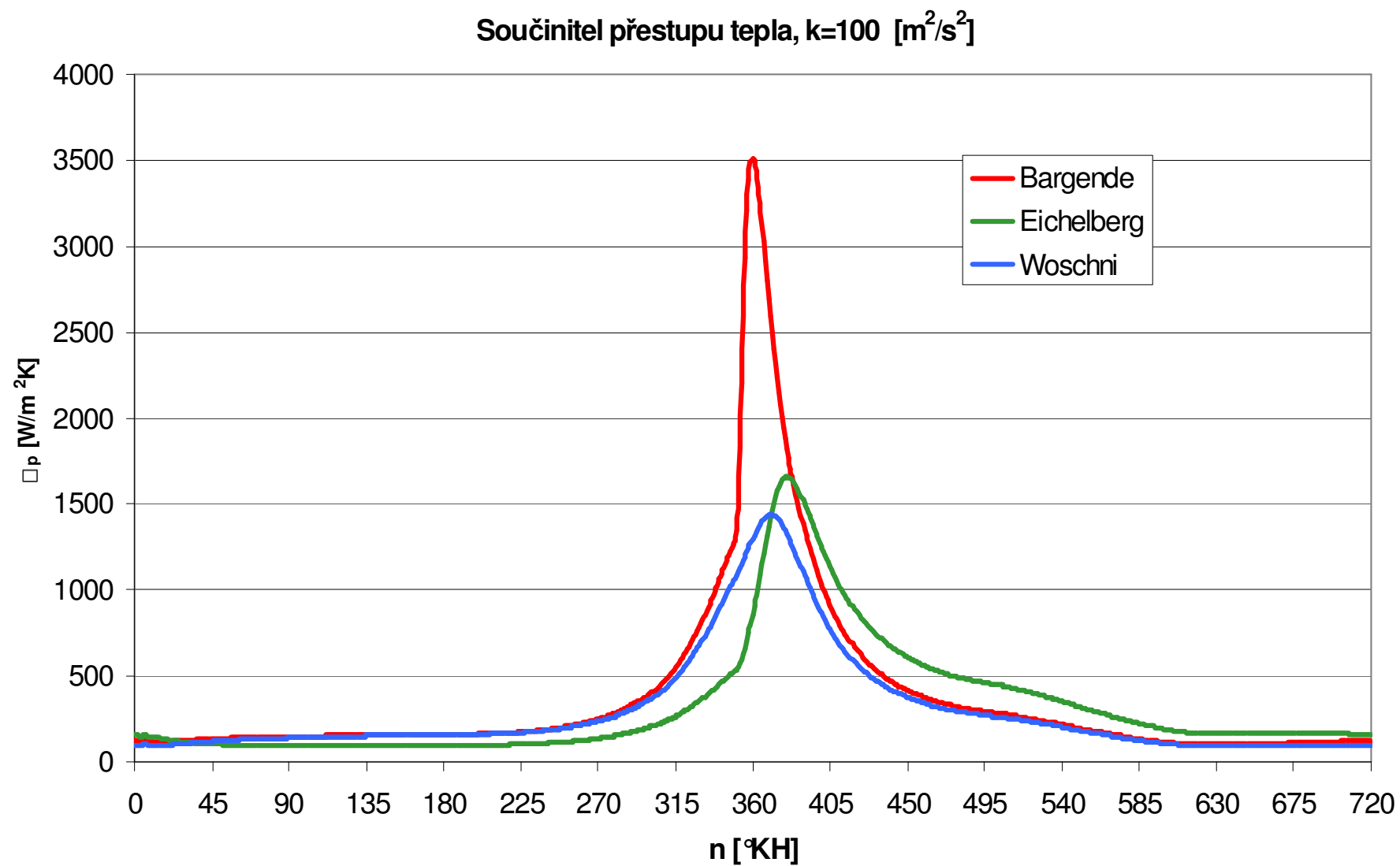


Příloha 21 Naměřený průběh p-V digramu motoru Jawa

PRŮBĚH SIL PŮSOBÍCÍCH NA PÍST

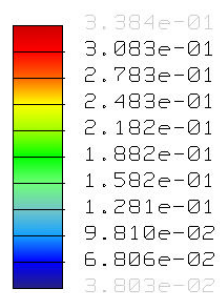
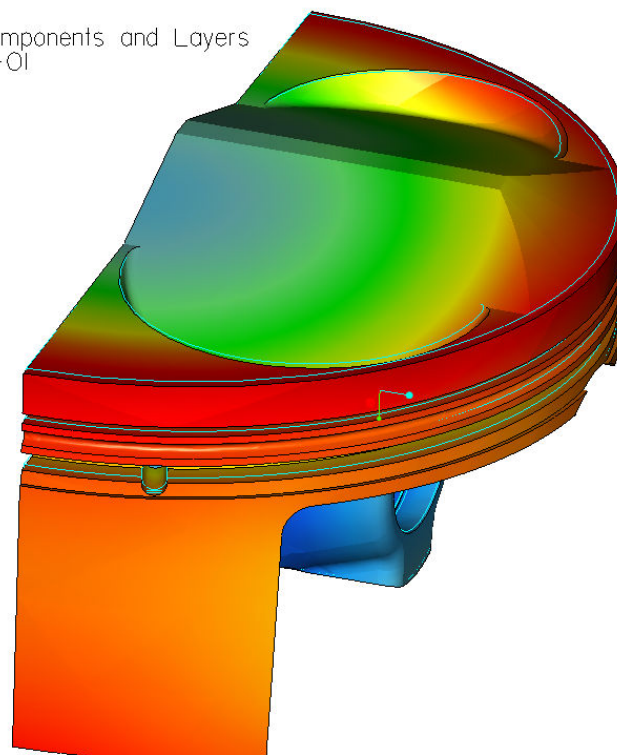


Příloha 22 Ukázka průběhů sil působících na píst

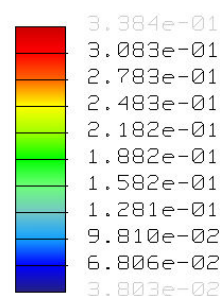
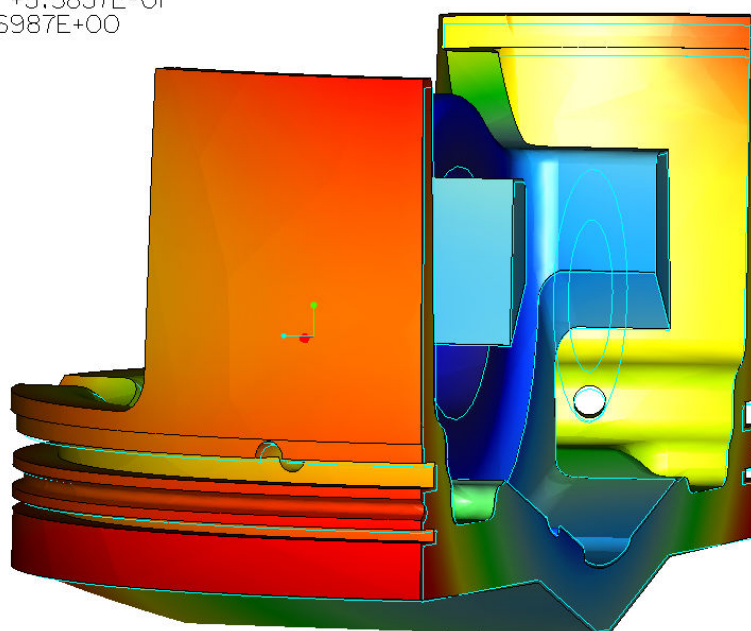


Příloha 23 Průběh koeficientů α pro dno pístu v závislosti na natočení klikového hřídele

Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed Location: Components and Layers
Max Disp +3.3837E-01
Scale 2.6987E+00
Combination

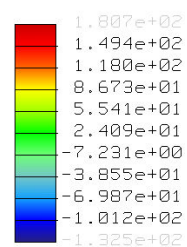
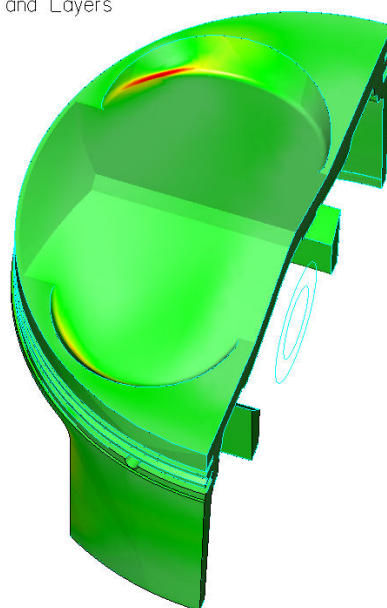


Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed Location: Components and Layers
Max Disp +3.3837E-01
Scale 2.6987E+00
Combination

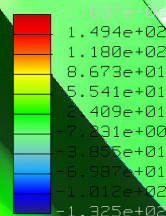
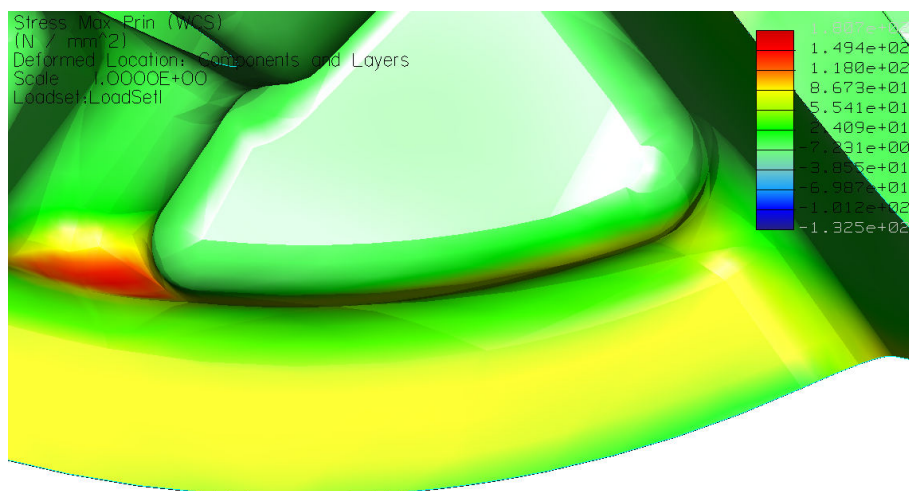


Příloha 24 Deformace pístu od teploty

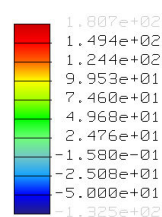
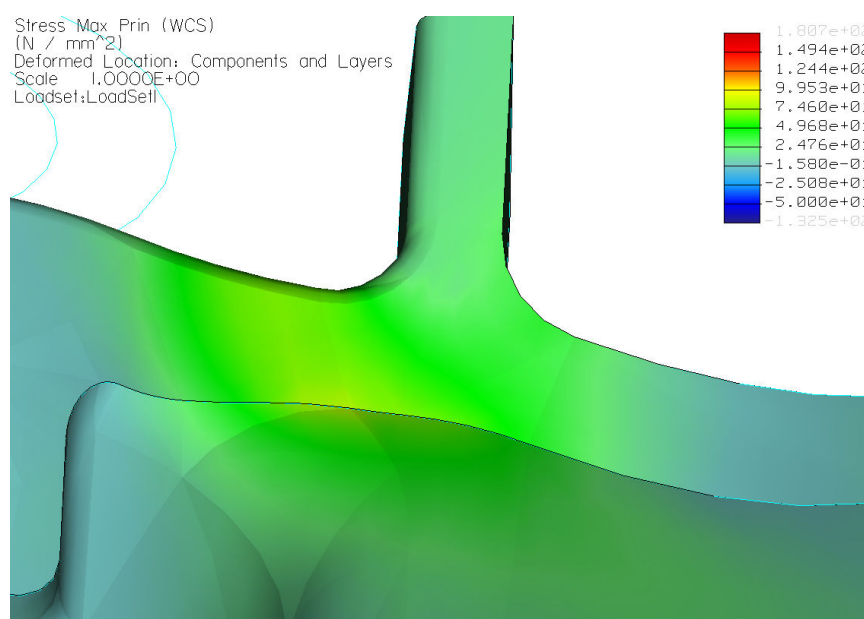
Stress Max Prin (WCS)
 (N / mm²)
 Deformed Location: Components and Layers
 Scale 1.0000E+00
 Loadset:LoadSet1



Stress Max Prin (WCS)
 (N / mm²)
 Deformed Location: Components and Layers
 Scale 1.0000E+00
 Loadset:LoadSet1

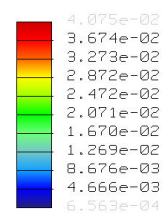
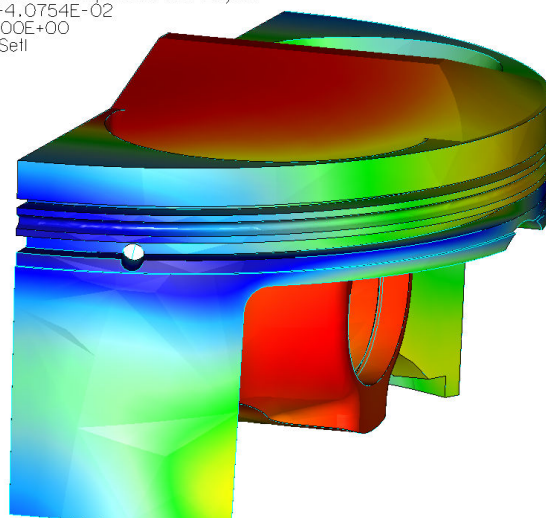


Stress Max Prin (WCS)
 (N / mm²)
 Deformed Location: Components and Layers
 Scale 1.0000E+00
 Loadset:LoadSet1

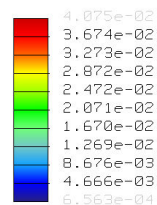
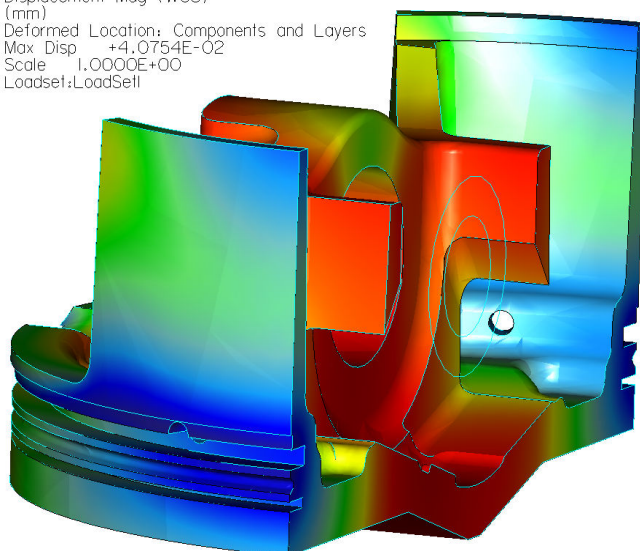


Příloha 25 Průběh napětí při zatížení tlakem a setrvačnými silami

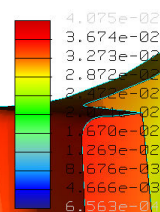
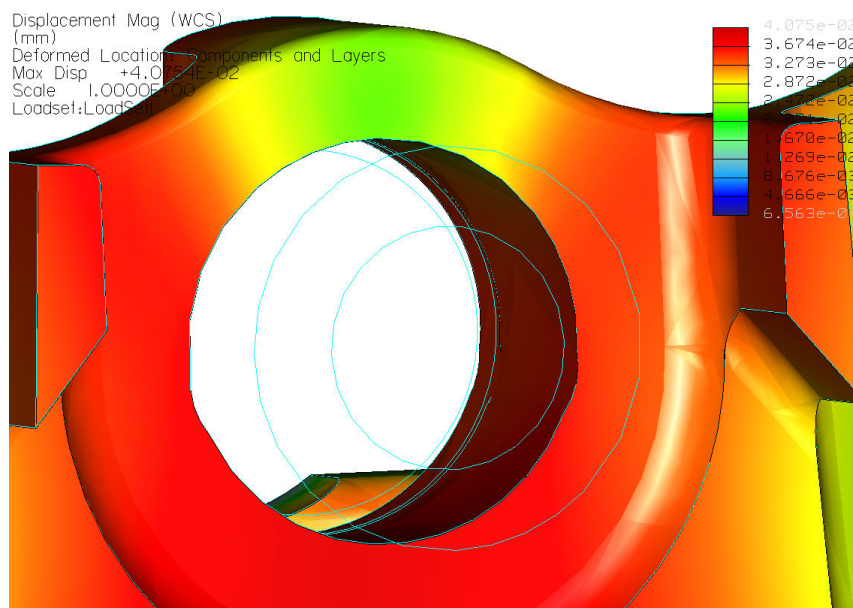
Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed Location: Components and Layers
Max Disp +4.0754E-02
Scale 1.0000E+00
Loadset:LoadSet1



Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed Location: Components and Layers
Max Disp +4.0754E-02
Scale 1.0000E+00
Loadset:LoadSet1

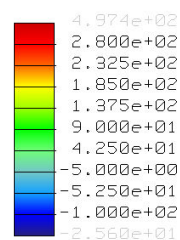
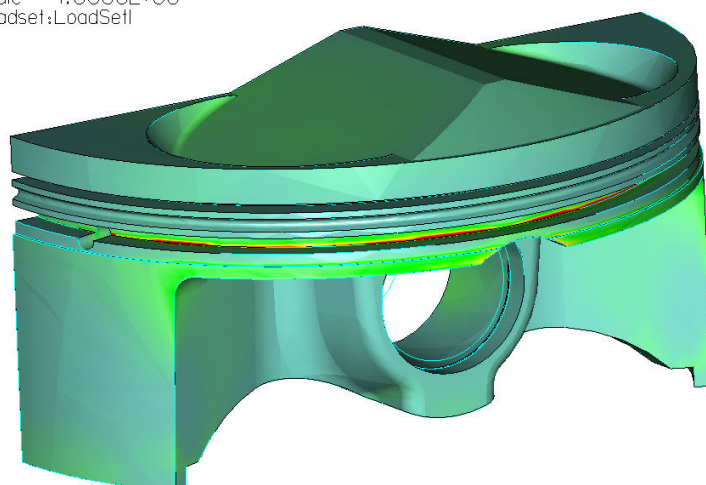


Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed Location: Components and Layers
Max Disp +4.0754E-02
Scale 1.0000E+00
Loadset:LoadSet1

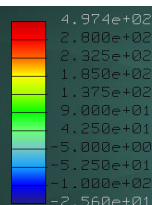
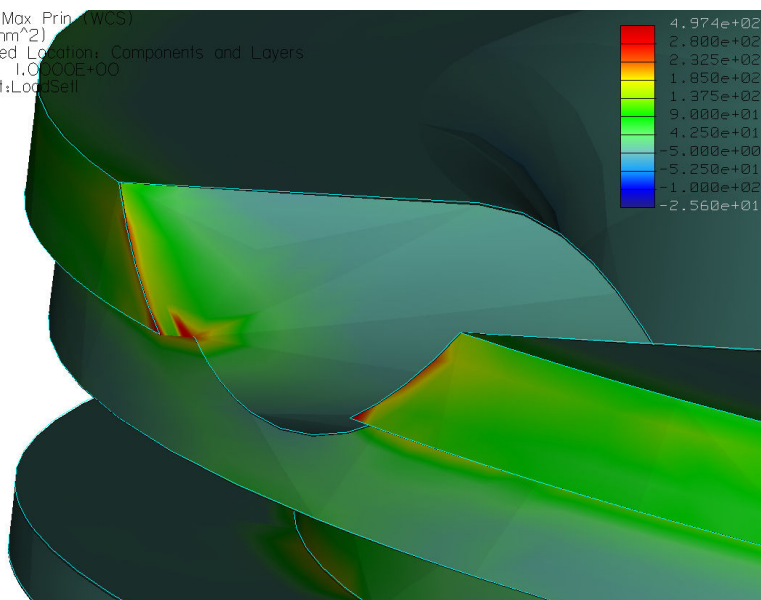


Příloha 26 Deformace pístu způsobené setrvačnými silami

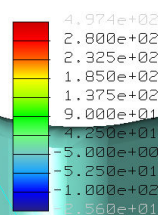
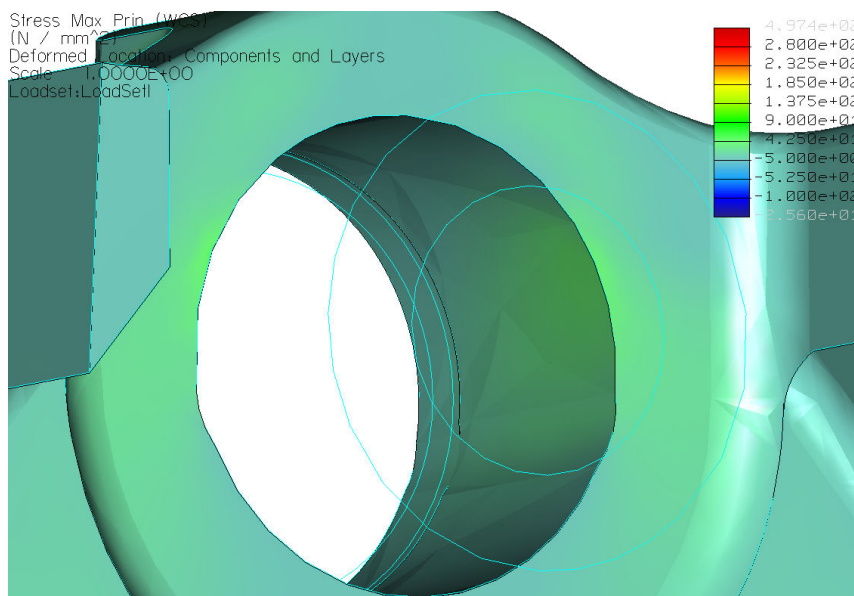
Stress Max Prin (WCS)
(N / mm²)
Deformed Location: Components and Layers
Scale 1.0000E+00
Loadset:LoadSet1



Stress Max Prin (WCS)
(N / mm²)
Deformed Location: Components and Layers
Scale 1.0000E+00
Loadset:LoadSet1



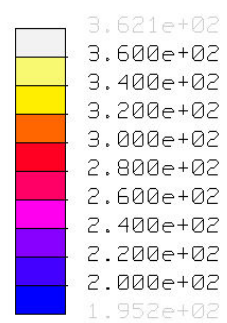
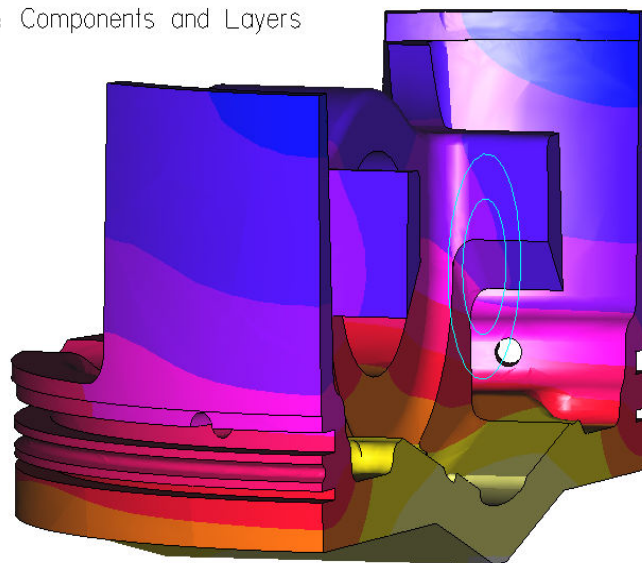
Stress Max Prin (WCS)
(N / mm²)
Deformed Location: Components and Layers
Scale 1.0000E+00
Loadset:LoadSet1



Příloha 27 Průběh napětí od setrvačných sil

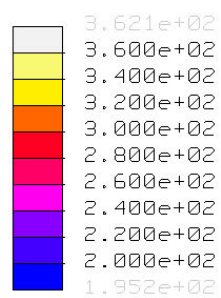
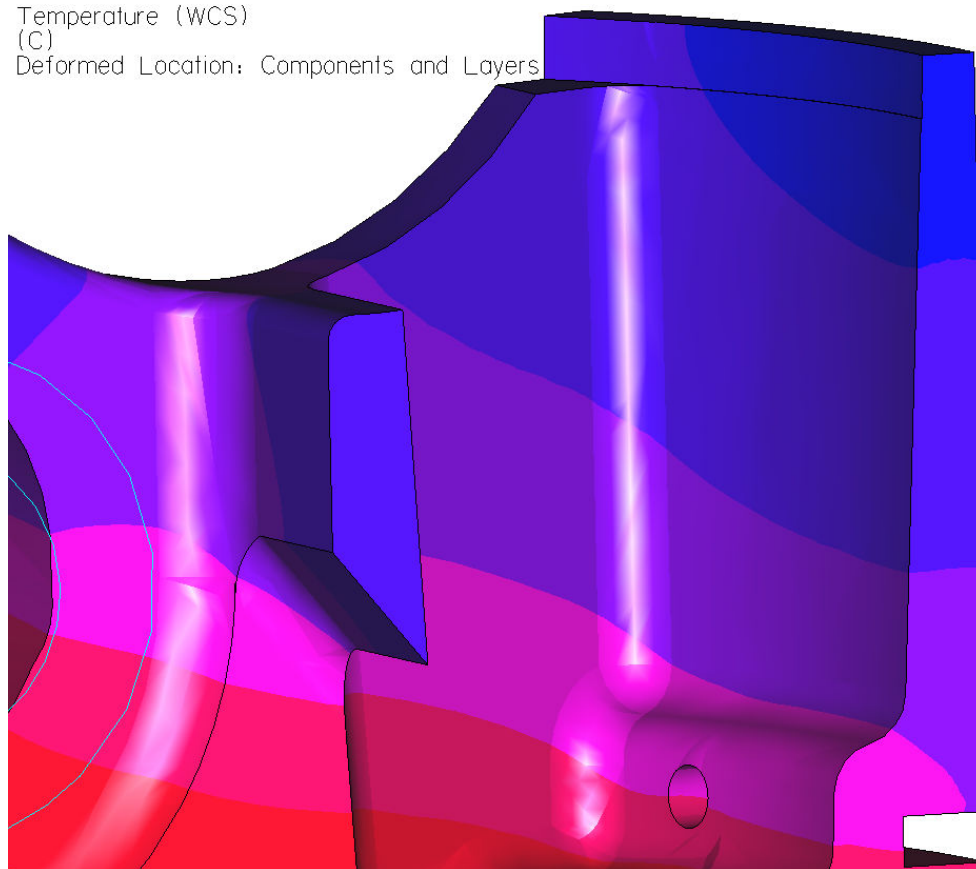
Temperature (WCS)
(C)

Deformed Location: Components and Layers

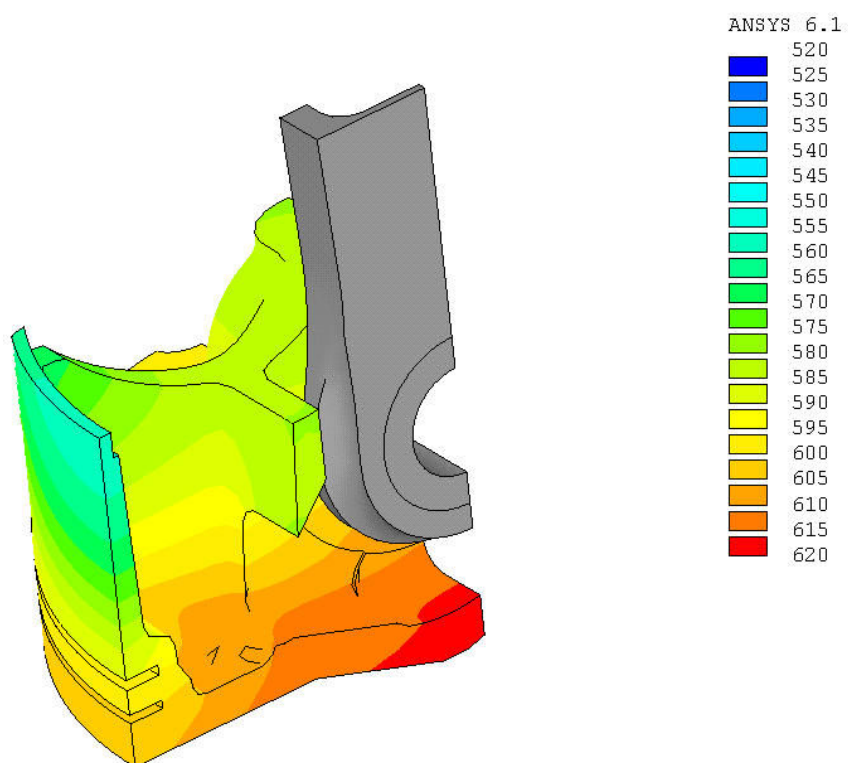
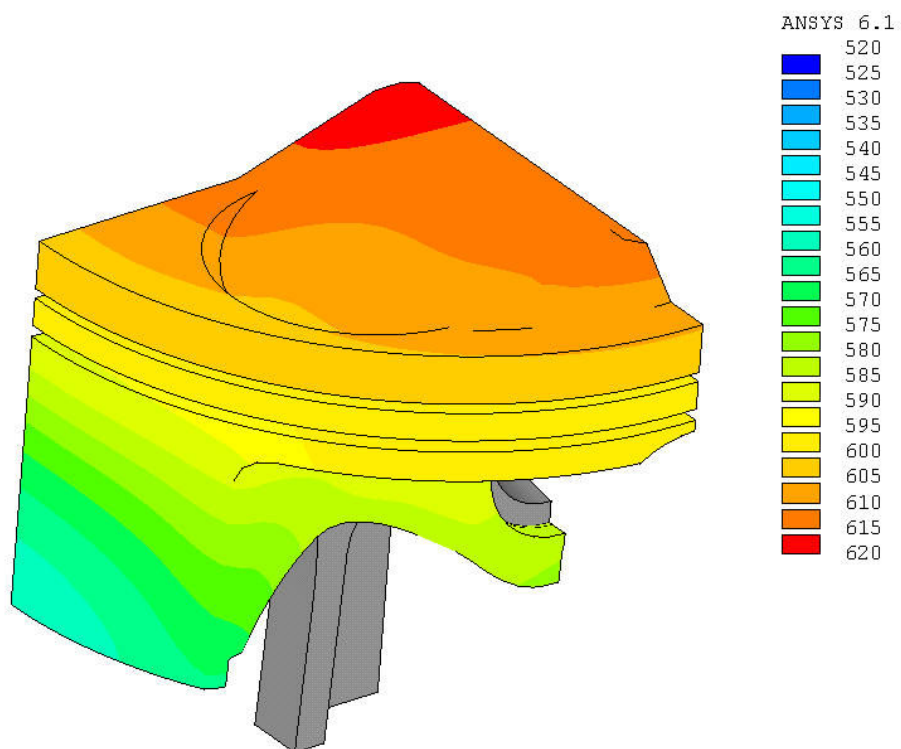


Temperature (WCS)
(C)

Deformed Location: Components and Layers

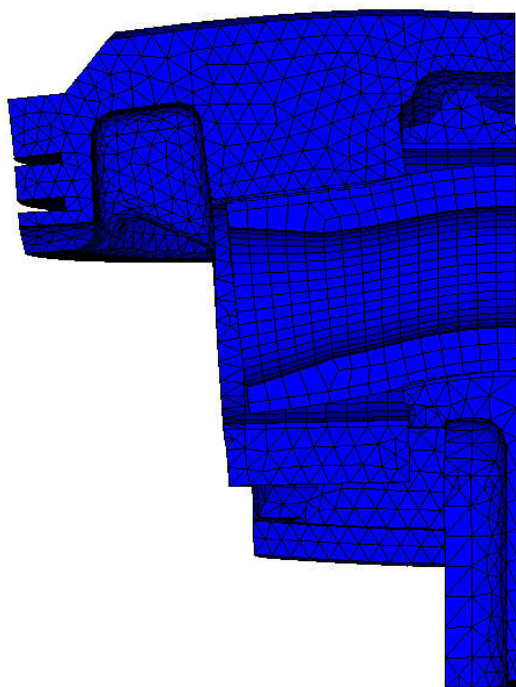


Příloha 28 Teplotní pole pístu



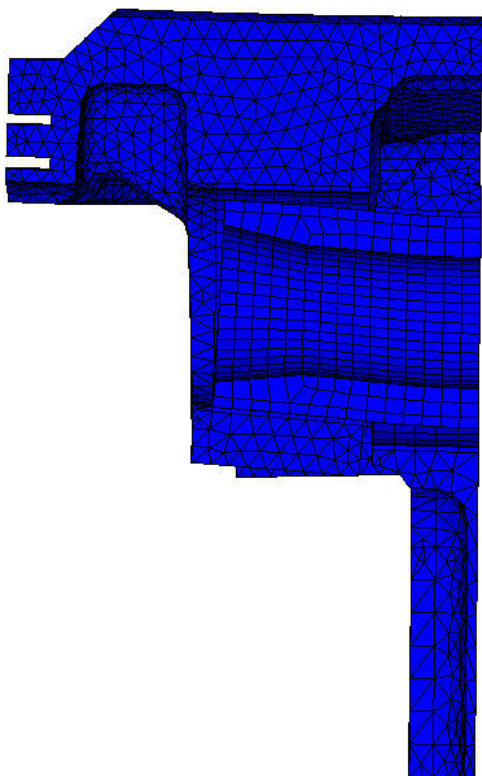
Příloha 29 Teplotní pole vytvořené v programu Ansys

ANSYS 6.1

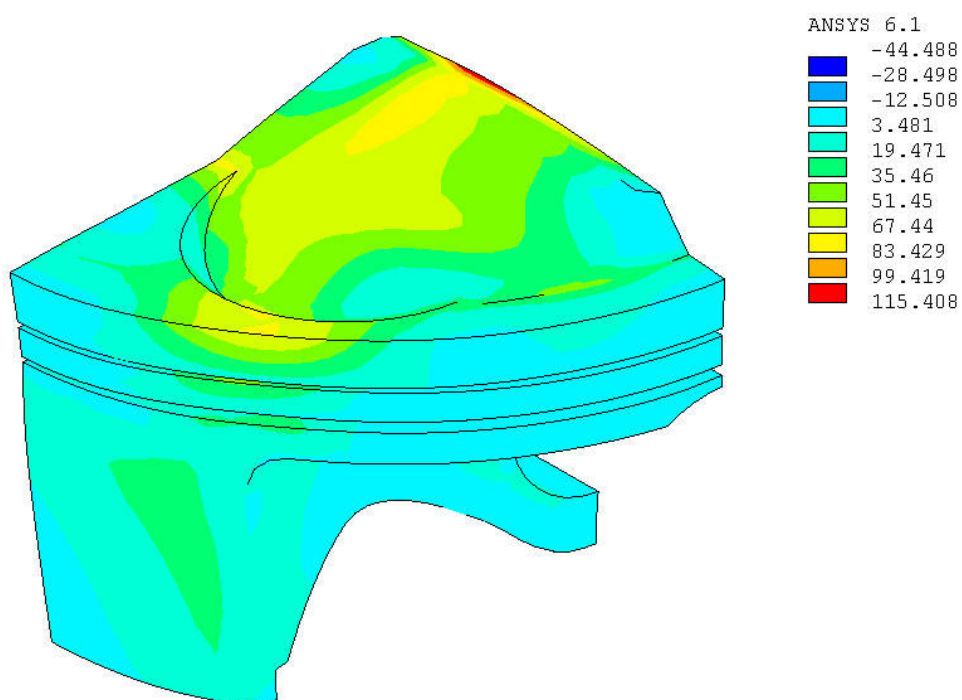
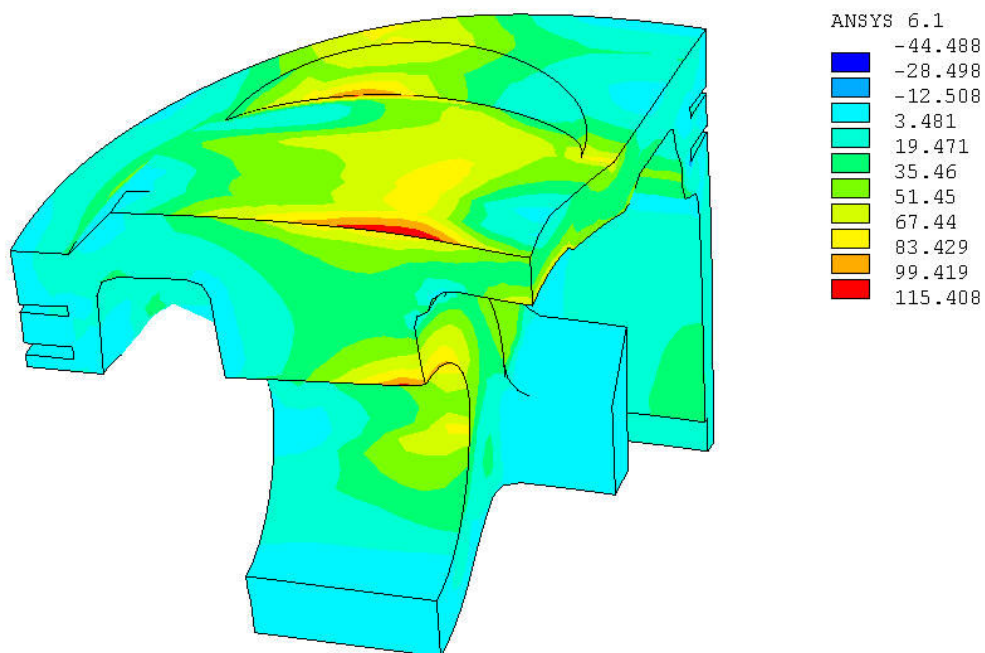


Příloha 30 Deformace způsobené od tlaků plynů program Ansys

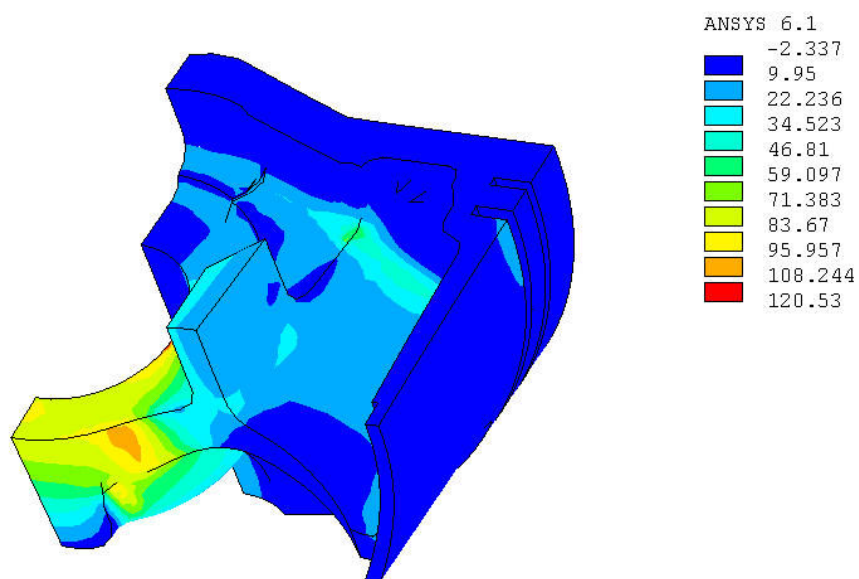
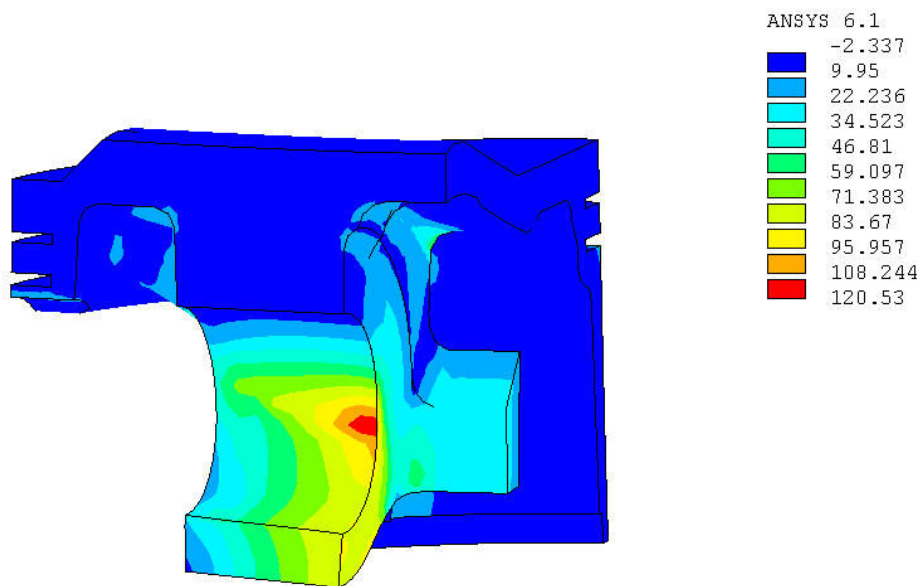
ANSYS 6.1



Příloha 31 Deformace způsobené setrvačnými silami program Ansys

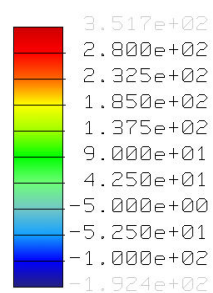
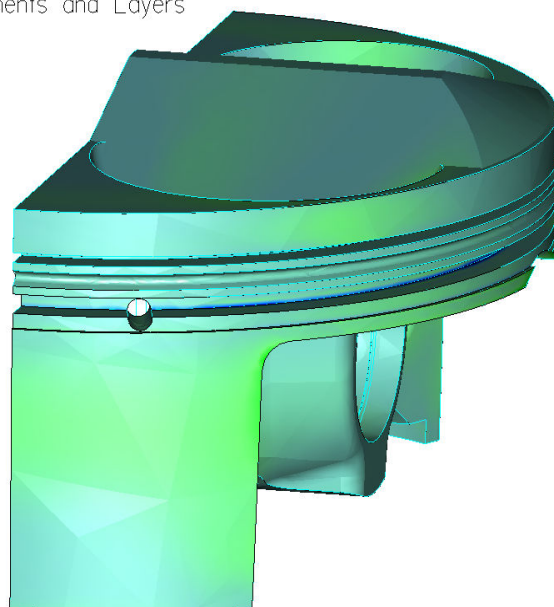


Příloha 32 Průběh napětí při působení tlaků plynů program Ansys

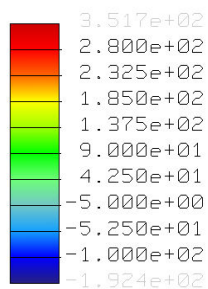
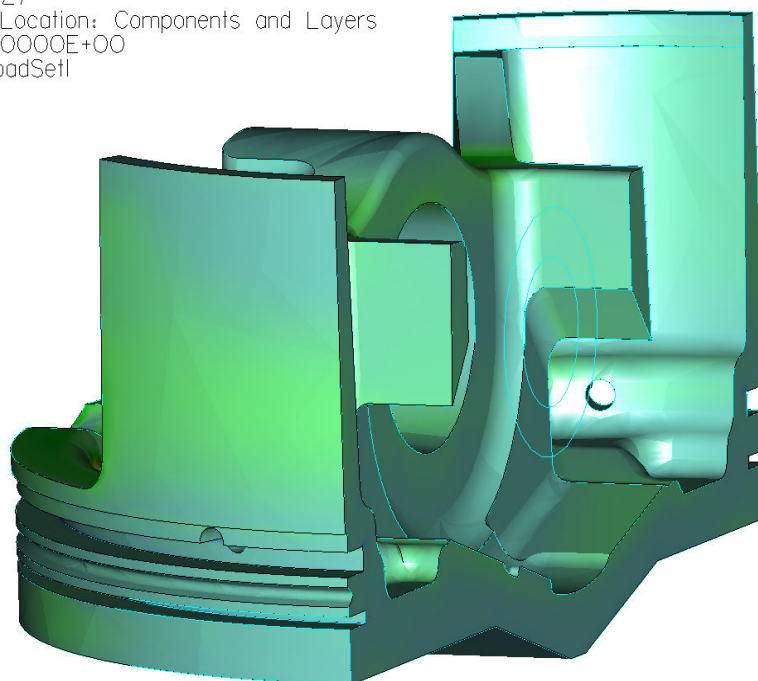


Příloha 33 Průběh napětí v pístu zatíženého setrvačnými silami program Ansys

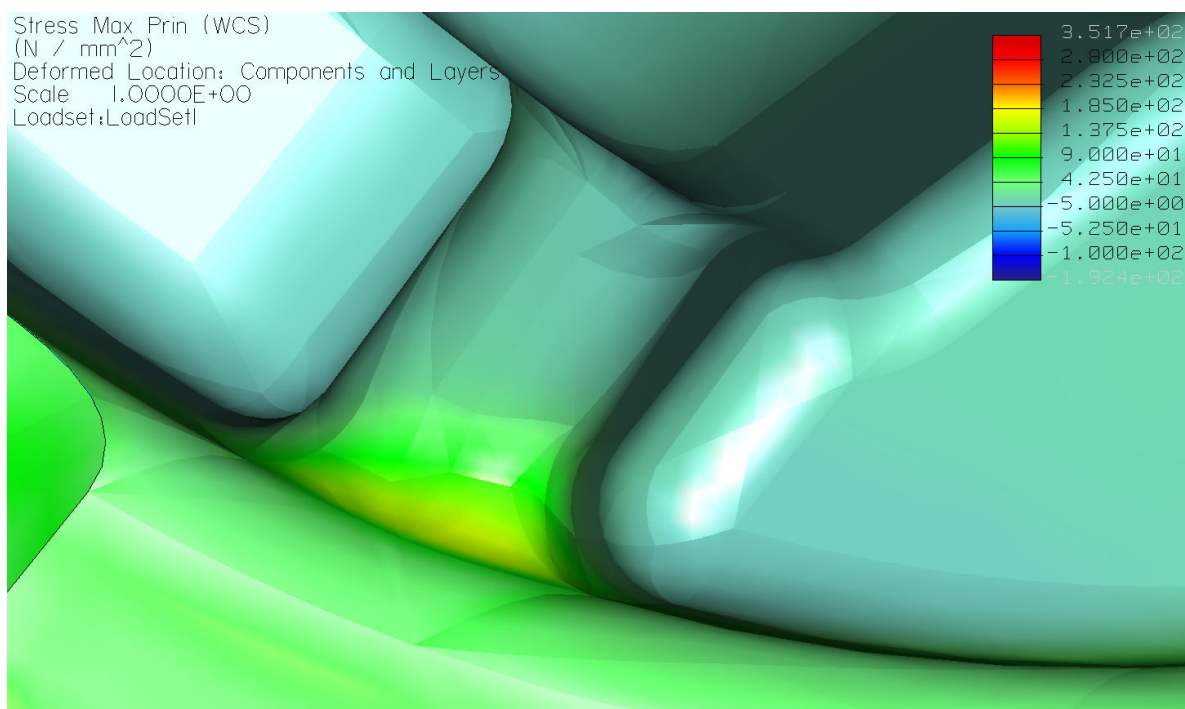
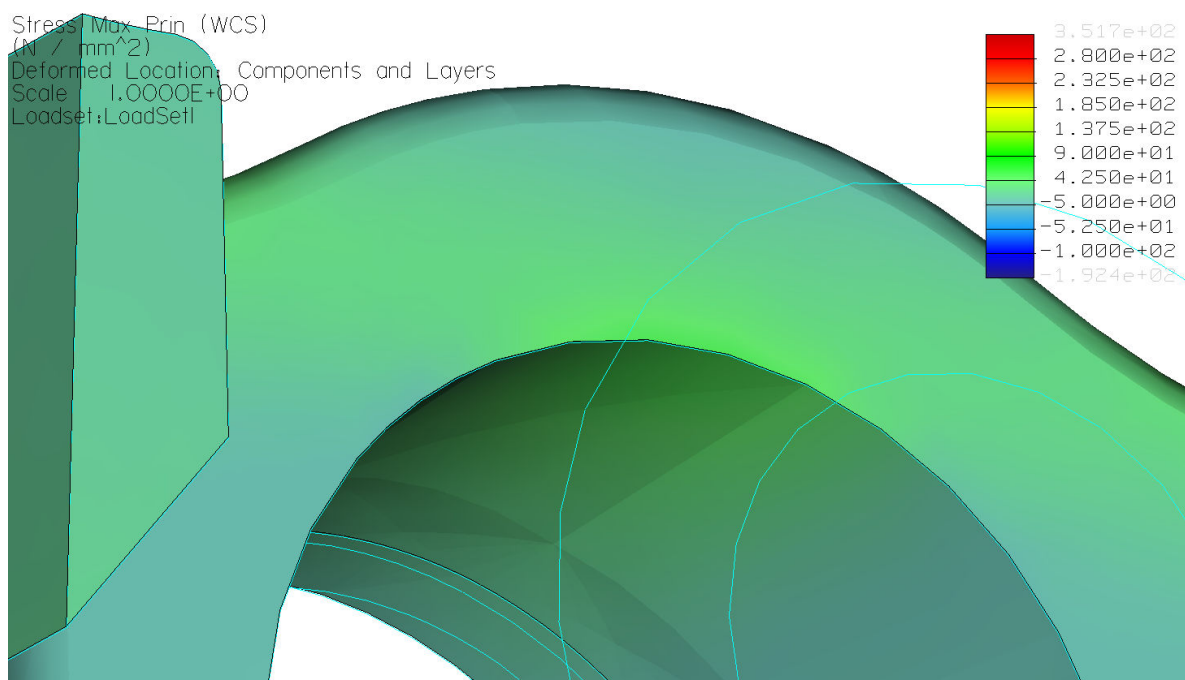
Stress Max Prin (WCS)
 (N / mm²)
 Deformed Location: Components and Layers
 Scale 1.0000E+00
 Loadset:LoadSetI



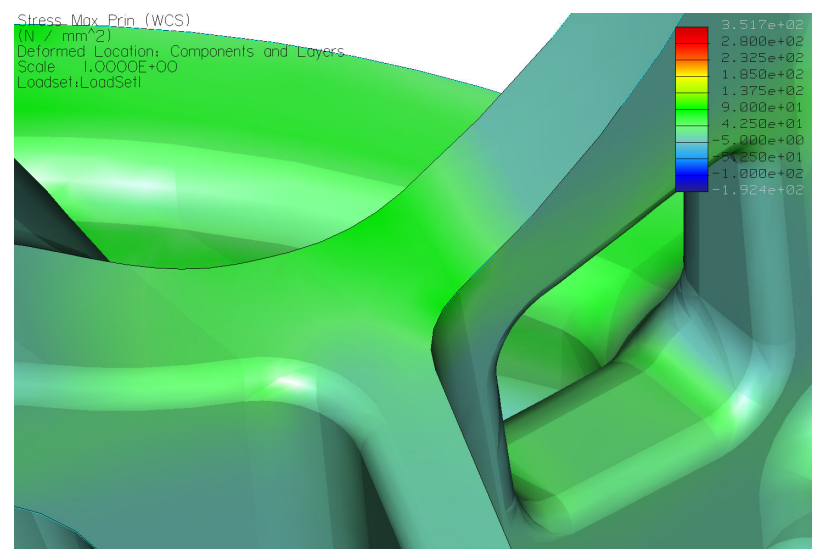
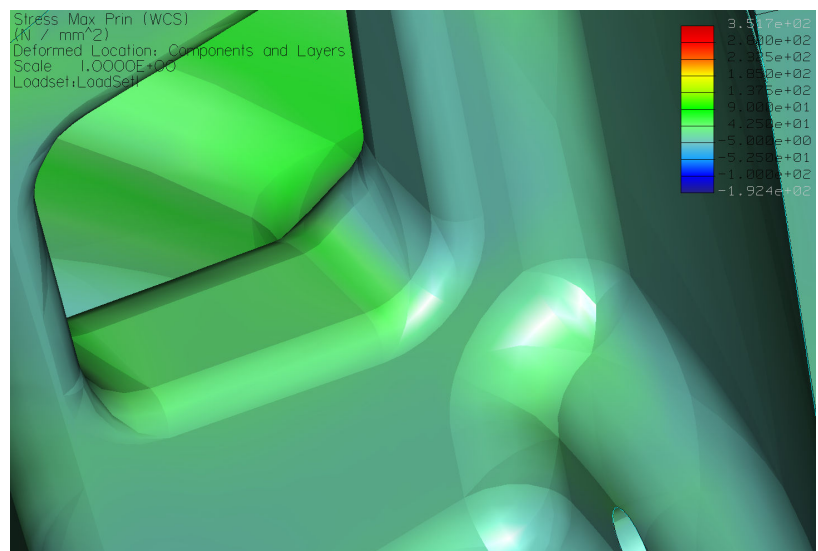
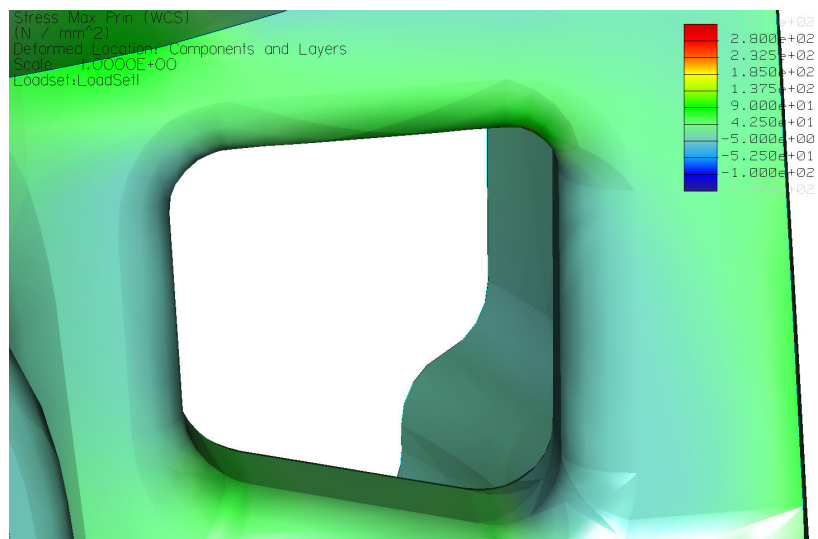
Stress Max Prin (WCS)
 (N / mm²)
 Deformed Location: Components and Layers
 Scale 1.0000E+00
 Loadset:LoadSetI



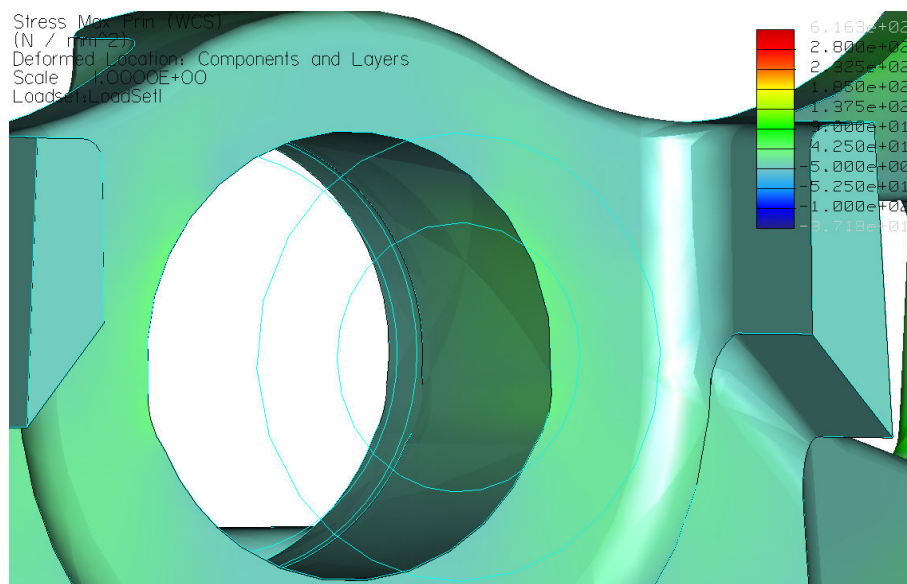
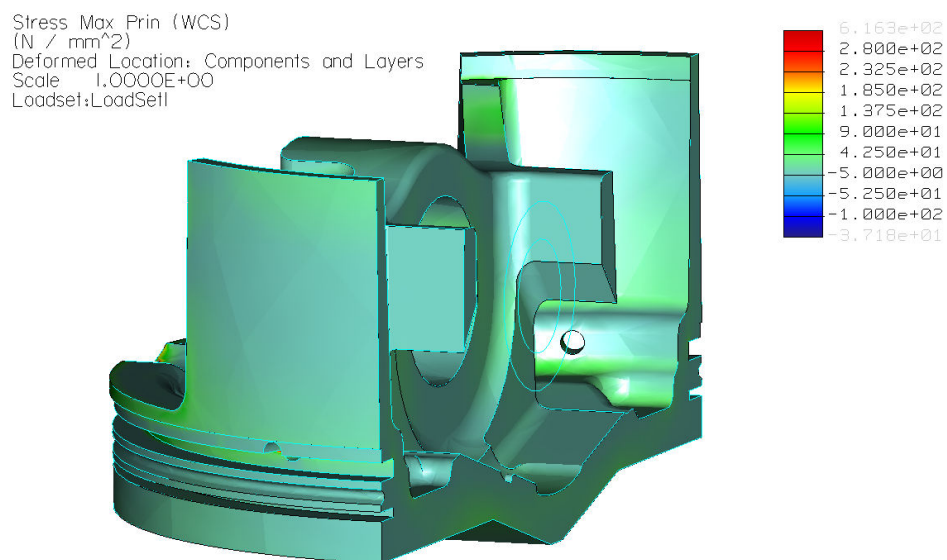
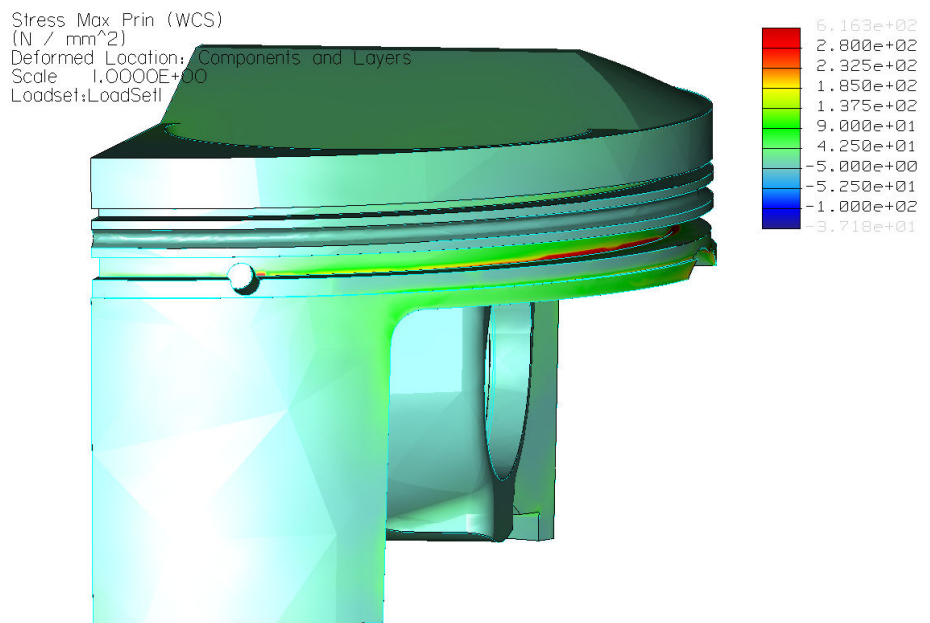
Příloha 34 Průběh napětí se zatížením od tlaků plynů



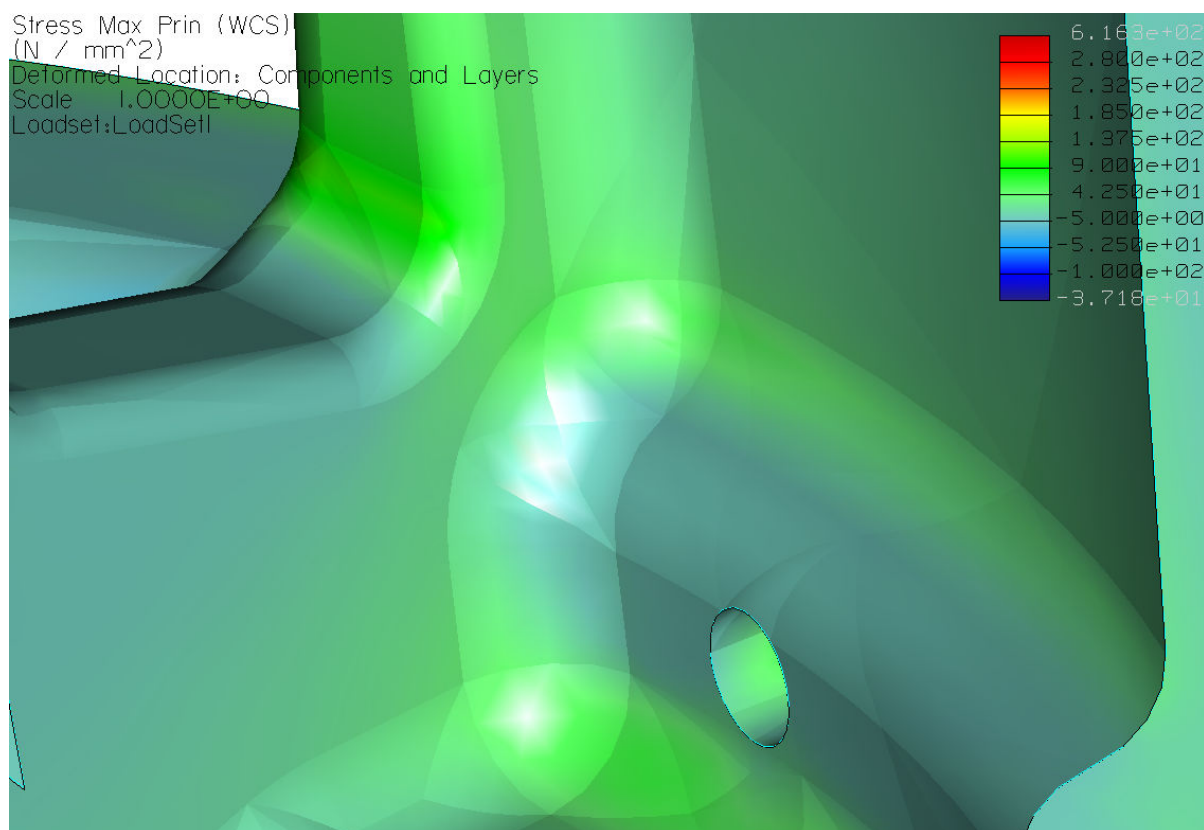
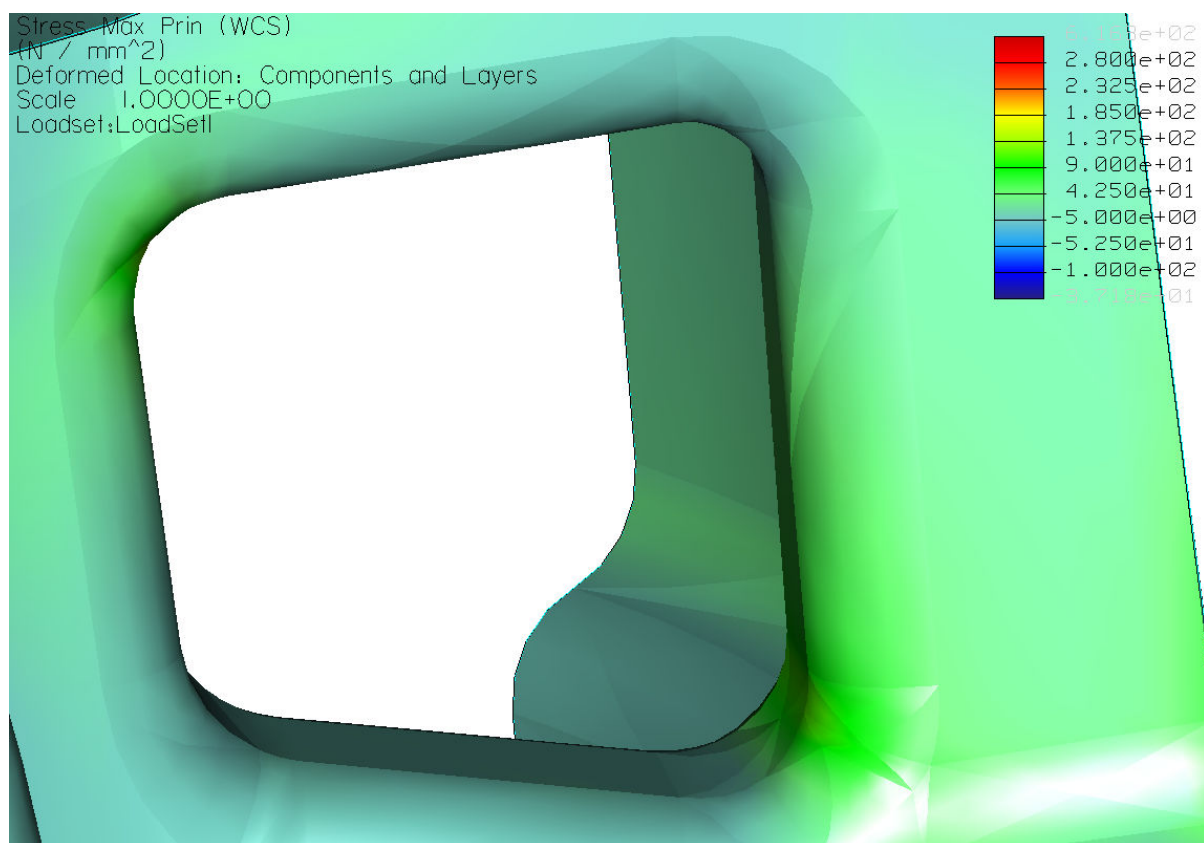
Příloha 35 Průběh napětí se zatížením od tlaků plynů



Příloha 36 Průběh napětí se zatížením od tlaků plynů - namáhání v odlehčeních



Příloha 37 Průběh napětí od setrvačných sil upravený model



Příloha 38 Průběh napětí od setrvačných sil upravený model